



Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Hauptgutachten

Wasser in einer aufgeheizten Welt





Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Wasser in einer aufgeheizten Welt

Mitglieder des WBGU

Prof. Dr. Karen Pittel (Co-Vorsitzende)

Direktorin des Zentrums für Energie, Klima und Ressourcen des ifo Instituts, Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung und Professorin an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Prof. Dr. Sabine Schlacke (Co-Vorsitzende)

Professorin für Öffentliches Recht, insb. Verwaltungs- und Umweltrecht an der Universität Greifswald und geschäftsführende Direktorin des Instituts für Energie-, Umwelt- und Seerecht (IfEUS).

Prof. Dr. Alexander Bassen

Professor für Kapitalmärkte und Unternehmensführung an der Universität Hamburg, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.

Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes

Leiter des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität München.

Prof. Dr. Markus Fischer

Professor für Pflanzenökologie am Institut für Pflanzenwissenschaften und Direktor des Botanischen Gartens der Universität Bern.

Prof. Dr. Anna-Katharina Hornidge

Direktorin des German Institute of Development and Sustainability (IDOS) und Professorin für Globale Nachhaltige Entwicklung an der Universität Bonn.

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Otto Pörtner

Leiter der Sektion Integrative Ökophysiologie am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

Prof. Dr. Claudia Traidl-Hoffmann

Professorin für Umweltmedizin an der Universität Augsburg und Direktorin des Instituts für Umweltmedizin bei Helmholtz Munich.

Prof. Dr. Anke Weidenkaff

Professorin an der TU Darmstadt für das Fachgebiet Werkstofftechnik und Ressourcenmanagement und Leiterin der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS.



Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Wasser in einer aufgeheizten Welt

**Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen (WBGU)**

Geschäftsstelle
Luisenstraße 46
10117 Berlin
Tel: 030 26 39 480
E-Mail: wbgu@wbgu.de
www.wbgu.de

Redaktionsschluss: 19.07.2024

Zur sprachlichen Gleichbehandlung: Als Mittel der sprachlichen Darstellung aller sozialen Geschlechter und Geschlechtsidentitäten wird in diesem Gutachten bei allen Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, der Genderdoppelpunkt (z. B. Leser:innen) verwendet.

Zitierweise für diese Publikation: WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Berlin: WBGU.

Leitautor:innen: Alexander Bassen, Jörg E. Drewes, Markus Fischer, Anna-Katharina Hornidge, Karen Pittel, Hans-Otto Pörtner, Sabine Schlacke, Claudia Traidl-Hoffmann, Anke Weidenkaff

Mitautor:innen: Mareike Blum, Kerstin Burghaus, Jonas Geschke, Tallulah Gundelach, Matti Gurreck, Rüdiger Haum, Sarah Löpelt, Oskar Masztalerz, Katharina Michael, Alexander Mitranescu, Katharina Molitor, Jürgen Orasche, Benno Pilardeaux, Marion Schulte zu Berge, Astrid Schulz, Dominique Schüpfer, Jan Siegmeier, Finn Arnd Wendland

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar.

ISBN 978-3-946830-09-2

© WBGU Berlin 2024

Die Vervielfältigung und Verbreitung originären Text- und Bildmaterials des WBGU ist, auch auszugsweise, mit Quellenangabe für nicht kommerzielle Zwecke gestattet. Text- und Bildmaterial aus Quellen Dritter unterliegt den urheberrechtlichen Bedingungen der jeweiligen Quellen.

Das diesem Bericht zu Grunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen 13N0708A5 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autor:innen.

Gestaltung: WERNERWERKE GbR, Berlin

Titelbild: Rosmarie Wirz/Kollektion: Moment Open/via Getty Images

Die illustrativen Elemente in der Zusammenfassung und am Anfang der Kapitel zeigen Ausschnitte hochauflösender Karten von Gewässerstrukturen in verschiedenen Weltregionen. Quelle: Pekel et al. (2016) und <https://global-surface-water.appspot.com>

Herstellung: WBGU

Satz: WBGU

Druck und Bindung: PIEREG Druckcenter Berlin

Mitarbeiter:innen des Beirats

Wissenschaftlicher Stab der Geschäftsstelle

Dr. Marion Schulte zu Berge
(Generalsekretärin)

Dr. Astrid Schulz
(stellvertretende Generalsekretärin)

Dr. Mareike Blum
(seit Mai 2023)

Tallulah Gundelach, M.Sc.

Dr. Rüdiger Haum
(seit Jan. 2024)

Oskar Masztalerz, Arzt, B.Sc.

Dr. Benno Pilardeaux
(Medien- und Öffentlichkeitsarbeit)

Dr. Jan Siegmeier

Verlagsmanagement, Administration und Assistenz in der Geschäftsstelle

Daniela Donadei, Dipl.-Des. (FH)
(Kommunikations- und Mediendesign)

Viola Martin, Dipl.-Kulturarbeiterin (FH)
(Sekretariat, Assistenz, Veranstaltungsmanagement)

Mario Rinn, B.Sc.
(Systemadministration, Grafik)

Studentischer Mitarbeiter in der Geschäftsstelle

Tom Puhlmann, M.Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen der Mitglieder des WBGU

Dr. Kerstin Burghaus
(ifo Institut, Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München)

Jonas Geschke, M.Sc.
(Universität Bern, Institut für Pflanzenwissenschaften – IPS)

Dr. Matti Gurreck
(Universität Greifswald, Greifswald; seit Juni 2023)

Sarah Löpelt, M.Sc.
(German Institute of Development and Sustainability – IDOS, Bonn; bis Sept. 2023)

Dr. Katharina Michael
(Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung)

Alexander Mitranescu, M.Sc.
(Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft)

Katharina Molitor, M.Sc.
(German Institute of Development and Sustainability – IDOS, Bonn; ab Okt. 2023)

Dr. Jürgen Orasche
Lehrstuhl für Umweltmedizin, Medizinische Fakultät, Universität Augsburg)

Dr. Dominique Schüpfer
(Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Alzenau)

Finn Arnd Wendland, M.Sc.
(Universität Hamburg, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)

Danksagung

Der Beirat dankt allen externen Expert:innen für die Zuarbeit und wertvolle Hilfe.

Als fachlichen Einstieg in das Thema erhielt der Beirat am 09. und 10. Mai 2023 wertvolle Anregungen während Expert:innenanhörungen mit Prof. Dr. Akiça Bahri (Landwirtschaftsministerin a.D., Tunesien), Prof. Dr. Christoph Donner (Berliner Wasserbetriebe) und Prof. Dr. Uli Paetzel (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft).

Sehr interessante Einblicke in die multilaterale Wasserpoltik eröffnete dem Beirat am 17. November 2023 Dr. Johannes Cullmann (UN Water).

Während der Expert:innenanhörung am 02. Mai 2024 hatte der Beirat Gelegenheit zum Austausch mit Prof. Dr. Dietrich Borchardt (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ), Dr. Ines Dombrowsky (German Institute of Development and Sustainability – IDOS), Prof. Dr. Dieter Gerten (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung – PIK), Prof. Dr. Hans-Peter Grossart (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei), Dr. Verena Höckele (Projekträger Karlsruhe/Wassertechnologie, Karlsruher Institut für Technologie – KIT), Prof. Dr. Torsten Schmidt (Instrumentelle Analytische Chemie, Universität Duisburg-Essen) und Prof. Dr. Kerstin Stahl (Institut für Hydrologie, Universität Freiburg).

Danken möchte der Beirat darüber hinaus jenen Personen, die durch Gespräche, Kommentare, Beiträge, Beratung, Recherche oder Peer Reviews einzelner Teile des Gutachtens dem Beirat wertvolle Dienste erwiesen haben: Dr. Axel Berger (German Institute of Development and Sustainability – IDOS), Prof. Dr. Clara Brandi (German Institute of Development and Sustainability – IDOS), Apl. Prof. Dr. Carsten Butsch (Geografisches Institut, Universität Bonn), Prof. Dr. Beate Escher (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Leipzig), Prof. Dr. Matthias Finkbeiner (Institut für Technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin), Dr. Christoph Lüthi (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz – Eawag), Dr. Farhad Mukhtarov (International Institute of Social Sciences – ISS, Erasmus University Rotterdam), Alexandra Skinner (Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH) und Dr. Olaf Wirth (Institut für Ökologie und Politik GmbH).

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiter:innen des Beirats	V
Danksagung	VI
Kästen	XV
Tabellen	XVII
Abbildungen	XVIII
Akronyme	XXI
Zusammenfassung	1
Einleitung	25
Status quo im Umgang mit der Ressource Wasser	29
2.1 Wasser: Essenzielle Ressource für alles Leben und die Rolle der Ökosysteme	30
2.2 Globaler Wasserkreislauf unter menschlichem Einfluss	33
2.2.1 Wasser umfassend gesehen – blaues und grünes Wasser	33
2.2.2 Beobachtbare Auswirkungen des Klimawandels	35
2.2.3 Bedeutung von Landnutzung und Klimawandel für grünes Wasser	38
2.2.4 Übernutzung von blauem Wasser	38
2.2.4.1 Trends der Wassernutzung	39
2.2.4.2 Meerwasserentsalzung	39
2.3 Wirtschaftliche und soziale Aspekte der Wassernutzung	40
2.3.1 Virtuelles Wasser	40
2.3.2 Wasser, Armut und soziale Ungleichheit	42
2.3.3 Verschmutzung als Herausforderung für Mensch und Ökosysteme	44
2.3.3.1 Pfadabhängigkeiten durch zentrale Wasserinfrastrukturen	44
2.3.3.2 Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel	45
2.3.3.3 Pathogene Mikroorganismen	45
2.3.3.4 Pharmazeutische Wirkstoffe	46
2.3.3.5 Industriechemikalien und Mikroplastik	47
2.3.3.6 Verschmutzung durch Rohstoffgewinnung und industrielle Aktivitäten	48
2.4 Politische und rechtliche Aspekte von Wasser	49
2.4.1 Internationale Leitbilder	50
2.4.1.1 Integriertes Wasserressourcenmanagement	51
2.4.1.2 Adaptives Wasserressourcenmanagement	52
2.4.1.3 Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus	52
2.4.2 Staatliche Wassergovernance	53
2.4.2.1 Völkerrechtlich bindende Konventionen	53
2.4.2.2 EU-Wasserrahmenrichtlinie: Ansätze für Multi-Ebenen-Governance	54
2.4.2.3 Kommunalabwasserrichtlinie	55
2.4.2.4 Wasserwiederverwendungsverordnung	56

2.4.3	Selbstorganisierte Wassergovernance	56
2.4.4	Wassergovernance an ihren Grenzen	58
2.4.4.1	Koordination	58
2.4.4.2	Teilhabe	58
2.4.4.3	Anpassungsfähigkeit	59
2.5	Investitionsbedarf und Finanzierungsherausforderungen	59
2.5.1	Wasserinfrastrukturinvestitionen	60
2.5.2	Wasserpreise und Steuerungsinstrumente	61
3	Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme	65
3.1	Verschärfungen durch Klimawandel und Verschmutzung	66
3.1.1	Fortschreitende Auswirkungen des Klimawandels auf den globalen Wasserkreislauf	66
3.1.1.1	Veränderte Niederschlagsmuster und -mengen	66
3.1.1.2	Abnehmende Bodenfeuchte in vielen Regionen	67
3.1.1.3	Abnahme globaler Süßwasserreservoirs: Grundwasser und Kryosphäre	68
3.1.1.4	Veränderte Abflussregime	70
3.1.1.5	Zunahme kombinierter Wasser-Extremereignisse	71
3.1.1.6	Meeresspiegelanstieg, variable Salinitäten und abnehmende Ozeanströme	73
3.1.1.7	Schlussfolgerungen	74
3.1.2	Extremereignisse (über)fördern die Infrastruktur	74
3.1.3	Auswirkungen von Dürren und Extremereignissen auf die Ernährungssicherheit	75
3.1.4	Verschärfungen durch Umweltverschmutzung	76
3.1.4.1	Trends der Wasserverschmutzung	77
3.1.4.2	Der Einfluss des Klimawandels auf Wasserverschmutzung	78
3.1.4.3	Wasserverschmutzung durch Mikroplastik	79
3.1.4.4	Chemikalienbelastung durch steigenden Rohstoffbedarf	79
3.1.4.5	Nährstoffe und schädliche Algenblüte	79
3.2	Verschärfungen durch sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen	80
3.2.1	Übernutzung von Wasserressourcen und Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen auf wirtschaftliche Entwicklung	80
3.2.1.1	Steigende Wassernachfrage und -konsum	80
3.2.1.2	Künftiger Handel mit wasserintensiven Gütern: Beispiel Agrargüter	81
3.2.1.3	Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen auf wirtschaftliche Entwicklung und Armutsbekämpfung	83
3.2.2	Soziale Ungleichheiten und geopolitische Machtverschiebungen	85
3.2.2.1	Geopolitische Verschärfungen	85
3.2.2.2	Soziale Ungleichheiten, Armut und Machtungleichgewichte verschärfen ungleiche Verteilung und Übernutzung von Wasser	86
3.3	Konsequenzen und Verschärfungen durch Gesundheitsschäden bei Arten, Ökosystemen und Menschen	88
3.3.1	Auswirkungen auf Süßwasserökosysteme, Organismen und Biodiversität	88
3.3.2	Zunehmende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	91
3.3.2.1	Trinkwasserverfügbarkeit und -qualität	92
3.3.2.2	Physische und psychische Gefahren zunehmender Extremereignisse	93
3.3.2.3	Zunehmende Ausbreitung von Infektionskrankheiten	94
3.4	Von globalen Verschärfungen zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension	94

4	Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension	97
4.1	Die neue Qualität regionaler Wassernotlagen	97
4.1.1	Veränderungen jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums	97
4.1.2	Exemplarische Auswahl regionaler Wassernotlagen: Überblick	98
4.2	Wasserknappheit in Städten und urbanen Agglomerationen	100
4.2.1	Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen	101
4.2.1.1	Wirkungsmuster	101
4.2.1.2	Heutiges Ausmaß und Projektionen	101
4.2.2	Ungleiche Lebensbedingungen und Wasser(un)sicherheit	102
4.2.3	Herausforderungen	104
4.3	Zunahme von Dürren und Sturzfluten in der MENA-Region	106
4.3.1	Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen	106
4.3.2	Zunehmende Wasserknappheit: Negative Folgen für Mensch und Natur	107
4.3.2.1	Schwindende Wasserressourcen durch nicht nachhaltige Nutzung	107
4.3.2.2	Auswirkungen auf politische und gesellschaftliche Stabilität und Konflikte	108
4.3.3	Zentrale Herausforderungen als Ansatzpunkte für politisches Handeln	110
4.3.3.1	Erschwertes Wassermanagement aufgrund struktureller Herausforderungen	111
4.3.3.2	Schwieriger werdende grenzüberschreitende Kooperation	111
4.4	Gletscherschmelze im Hindukusch-Karakorum-Himalaya: Verlust natürlicher Wasserspeicher	112
4.4.1	Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen	112
4.4.1.1	Klimawandelbedingter Rückgang der Gletscher und veränderte Abflussmengen	112
4.4.1.2	Verstärkung von Wasserknappheit durch steigenden Wasserbedarf und Infrastrukturprojekte	114
4.4.2	Destabilisierungspotenziale: Wasserknappheit, Naturgefahren und geopolitische Konflikte	116
4.4.2.1	Zunehmende Wasserknappheit: Konsequenzen für die Ernährungs- und Energiesicherheit	116
4.4.2.2	Zunehmende Naturgefahren: Bedrohung für Menschenleben und Infrastruktur	118
4.4.2.3	Gesellschaftliche und geopolitische Konflikte	118
4.4.3	Zentrale Herausforderungen	118
4.5	Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika	119
4.5.1	Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen	119
4.5.2	Folgen der Wasserverschmutzung für Mensch und Natur	122
4.5.3	Zentrale Herausforderungen	123
4.6	Übernutzung des Grundwassers und Klimawandel im Central Valley, USA	125
4.6.1	Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen	125
4.6.2	Ökologisches und sozioökonomisches Destabilisierungspotenzial	128
4.6.3	Zentrale Herausforderungen	129
4.7	Von regionalen Wassernotlagen zu Mustern mit planetarer Dimension	131
4.7.1	Ansatzpunkte für einen besseren Umgang mit Wassernotlagen	131
4.7.2	Lücken im Verständnis regionaler Wassernotlagen	132
5	Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit sichern	135
5.1	Grenzen erkennen	135
5.2	Handlungsbedarfe und -prinzipien	138
5.2.1	Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur sicherstellen	138

5.2.2	Anpassungsfähigkeit angesichts fortlaufender Veränderungen steigern	138
5.2.3	Resilienz und Risikovorsorge statt Gefahrenabwehr	139
5.2.4	Blaues und grünes Wasser sektorübergreifend bewirtschaften	139
5.2.5	Wissenschaftsbasierten Diskurs über Probleme und Handlungsoptionen ermöglichen	140
5.2.6	Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen	140
5.2.7	Umsetzung beschleunigen – Selbstorganisation fordern und fördern	141
5.3	Jenseits der Grenzen	141
6	Klimaresilientes Wassermanagement	143
6.1	Umgang mit Verschärfungen und Notlagen	144
6.1.1	Umsetzung der Handlungsprinzipien eines klimaresilienten Wassermanagements	144
6.1.2	Vier Anforderungen an die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen	148
6.1.2.1	Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen	148
6.1.2.2	Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext	149
6.1.2.3	Stärkere Berücksichtigung möglicher Mehrgewinne	150
6.1.2.4	Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen	151
6.1.3	Instrumente zur Abwägung unter Unsicherheit	152
6.1.4	Steuerung durch Planung und Zulassung	153
6.2	Lösungsraum Ökosysteme	155
6.2.1	Renaturierung für klimaresilientes Wassermanagement	155
6.2.2	Renaturierung von Feuchtgebieten	157
6.2.2.1	Beispiel Sümpfe und Marschen	157
6.2.2.2	Beispiel Moore	159
6.2.2.3	Beispiel Flusslandschaften, einschließlich Auen	160
6.3	Lösungsraum Landwirtschaft	162
6.3.1	Eingriffe der Landwirtschaft in den Wasserhaushalt	163
6.3.2	Angepasste Anbauweisen mit grünwasserbezogenen Maßnahmen kombinieren	164
6.3.3	Landwirt:innen sind auch Grünwasserwirt:innen – Handlungsbereiche zur Umsetzung	167
6.4	Lösungsraum Städte	169
6.4.1	Wassersensible Stadtentwicklung als Leitbild etablieren	169
6.4.2	Klimaresilientes Wassermanagement im Kontext urbaner Transformationen	171
6.4.3	Der Ausbau blau-grüner Infrastruktur als urbane Mehrgewinnstrategie	171
6.5	Handlungsempfehlungen	175
6.5.1	Übergreifende Handlungsempfehlungen	175
6.5.2	Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Ökosysteme	180
6.5.3	Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Landwirtschaft	181
6.5.4	Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Städte	182
6.6	Forschungsempfehlungen	183
6.6.1	Übergreifende Forschungsempfehlungen	183
6.6.2	Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Ökosysteme	186
6.6.3	Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Landwirtschaft	187
6.6.4	Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Städte	188
7	Schutz der Wasserqualität	191
7.1	Stoffbezogenes Unionsrecht zum Schutz der Wasserqualität	193
7.1.1	Chemikalienrecht in der EU	193

7.1.1.1	Neue Verfahren zur Chemikalienbewertung	194
7.1.2	Novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie	194
7.1.3	Globale Verbreitung und Rezeption von EU-Ansätzen	195
7.1.3.1	Globales Rahmenwerk für Chemikalien	195
7.1.3.2	Science-Policy Panel für Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung	197
7.2	Diffuse Stoffeinträge in den Wasserkreislauf	197
7.2.1	Pestizide und Nährstoffe	197
7.2.2	Pharmazeutika	198
7.2.3	Mikroplastik	198
7.3	Alternative Abwasserentsorgungskonzepte in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen	200
7.3.1	Flexibler Einsatz zentraler und dezentraler Abwassersysteme	200
7.3.2	Praxisbeispiel: Das Lusaka Sanitation Program	201
7.4	Effekte der Energiebereitstellung auf die Wasserqualität	202
7.4.1	Auswirkungen der Stromerzeugung auf die Wasserqualität	203
7.4.1.1	Verschmutzung durch fossile Energieträger	203
7.4.1.2	Gesundheits- und Umweltrisiken durch Materialgewinnung für die Energiewende	204
7.4.1.3	Recycling von lithiumbasierten Batterien	205
7.4.2	Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser	205
7.5	Handlungsempfehlungen	209
7.5.1	EU-Kommunalabwasserrichtlinie zielgerichtet umsetzen	209
7.5.2	Diffuse Einträge aus Land- und Forstwirtschaft verringern	209
7.5.3	Wasserverschmutzung durch Pharmazeutika eindämmen	211
7.5.4	Den Einsatz moderner Testverfahren fördern	211
7.5.5	Nutzung alternativer Abwasserentsorgungskonzepte fördern	212
7.5.6	Rohstoffrückgewinnung aus Abwasser fördern	212
7.6	Forschungsempfehlungen	212
8	Entwicklung einer klimaresilienten Wassergovernance	215
8.1	Internationale Verantwortung und Kooperation	217
8.1.1	Internationale Wassergovernance stärken	217
8.1.1.1	Die Agenda 2030 als normatives Fundament internationaler Wasserk Kooperation	217
8.1.1.2	Gelegenheitsfenster und Schnittstellen auf globaler Ebene	219
8.1.1.3	Internationale Wasserdiplo matie stärken	220
8.1.1.4	Ausgestaltung einer Internationalen Wasserstrategie	223
8.1.1.5	Institutioneller Rahmen für UN-Wasserkonferenzen	225
8.1.1.6	Wasserkonventionen stärken: grünes Wasser integrieren, wasserbezogene Konventionen verzahnen und Staaten zum Beitritt animieren	226
8.1.1.7	Berücksichtigung der Internationalen Wasserstrategie in UN-Prozessen und jenseits von UN-Gremien	228
8.1.1.8	Politikkohärenz nach innen und außen herstellen	228
8.1.2	Regionale Verantwortungsübernahme und Koordination fördern	228
8.1.3	Chancen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen nutzen	229
8.1.3.1	Integration von Wasser in wirtschaftliche Entscheidungen auf internationaler Ebene stärken	231
8.1.3.2	Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik an den Zielen der Internationalen Wasserstrategie ausrichten	231
8.1.3.3	Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens stärken ...	233

8.2	Gestaltender Staat und Förderung der Selbstorganisation klimaresilienten Wassermanagements	234
8.2.1	Selbstorganisierte Wassergovernance im Kontext eines gestaltenden Staates	234
8.2.2	Hybride Governance im Umgang mit verschärften Risiken – nationale Praxisbeispiele	236
8.2.3	Dialogforen mit deliberativen Elementen als Instrumente hybrider, klimaresilienter Wassergovernance	239
8.3	Finanzierung für lokale Ansätze mobilisieren und vermitteln	242
8.3.1	Wasserbezogene Risiken transparent machen, um Investitionen zu mobilisieren und zu lenken	244
8.3.1.1	Informationsangebot zur Bewertung von Wasserrisiken verbessern	245
8.3.1.2	Nachhaltigkeitsberichterstattung zu wasserbezogenen Auswirkungen, Risiken und Chancen stärken	246
8.3.2	Wassersektor attraktiver machen durch stabilere Einnahmequellen	247
8.3.2.1	Verursacher und Nutzer stärker an Kosten beteiligen	247
8.3.2.2	Stärkung der Kompetenz zur Mittelherhebung- und Verwendung auf lokaler Ebene	248
8.3.2.3	Mehrgewinne nutzen und private Akteure besser entlohnen	249
8.3.3	Finanzierungen vermitteln: Intermediäre Institutionen strategisch stärken	250
8.4	Wissenschaft und Bildung	254
8.4.1	Wissenschaft	254
8.4.1.1	Wissenschaft im Lichte der Verschärfungen	254
8.4.1.2	Internationale Wissenschaftskooperation für klimaresilientes Wassermanagement	258
8.4.1.3	Water Mapping Initiative	260
8.4.2	Bildung	261
8.5	Handlungsempfehlungen	262
8.5.1	Internationale Wassergovernance stärken	262
8.5.1.1	Wasserdiplomatie auf internationaler und regionaler Ebene voranbringen	262
8.5.1.2	Schnittstellen stärken und nutzen	263
8.5.1.3	Chancen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen nutzen	263
8.5.1.4	Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens	264
8.5.2	Staatliche Gestaltung und zivilgesellschaftliche Selbstorganisation	265
8.5.3	Finanzierung mobilisieren und vermitteln	266
8.5.3.1	Investitionsbereitschaft erhöhen, Finanzierungskosten senken: bessere Transparenz über wasserbezogene Risiken	266
8.5.3.2	Stabilisierung der Einnahmen von öffentlichen und privaten Investoren	267
8.5.3.4	Intermediäre und lokale Kooperationsplattformen stärken	269
8.5.4	Proaktive Rolle der Wissenschaft: Politik und Stakeholder zusammenbringen	269
8.5.5	Bildung als Grundlage für eine informierte Gesellschaft	271
8.6	Forschungsempfehlungen	272
8.6.1	Internationale Zusammenhänge verstehen und kommunizieren	272
8.6.2	Bi- und multilaterale Wissenschaftsförderung ausbauen	273
8.6.3	Forschung für eine nachhaltige Finanzierung	274
8.6.4	Forschung zu Herausforderungen der politischen Kommunikation	275
9	Kernbotschaften	277
	Literatur	283
	Glossar	321

Kästen

Kasten 1	Kernbotschaften	2
Kasten 2	Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension	6
Kasten 3	Anforderungen an Maßnahmen eines klimaresilienten Wassermanagements	10
Kasten 2.2-3	Partizipative Governance und intermediäre Strukturen bei der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Beispiele Schweden und Deutschland	57
Kasten 2.4-4	Wasserbezogene Pfadabhängigkeiten und Lock-ins	59
Kasten 4.2-1	Wasserkrise in São Paulo, Brasilien, 2014–2016: Umsetzungsdefizite der urbanen Wassergesetzgebung	103
Kasten 4.2-2	Wasserkrise 2019 in Chennai, Indien: Wassermangel in einer der niederschlagsreichsten Megastädte der Welt	104
Kasten 4.5-1	Das Nigerdelta: ein Biodiversitäts-Hotspot unter Druck	123
Kasten 5.1-1	Anpassung, Anpassungsgrenzen und Grenzen der Beherrschbarkeit	137
Kasten 6.1-1	Auf einen Blick: Vier Anforderungen, die bei der Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zu beachten sind	146
Kasten 6.1-2	Decision Scaling	153
Kasten 6.1-3	Steuerung durch Planung	154
Kasten 6.3-1	Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte	163
Kasten 6.3-2	Agroforstwirtschaft	164
Kasten 6.4-1	Praxisbeispiel: Blau-grüne Infrastruktur in Städten – der „Wolkenbruchplan“ in Kopenhagen	174
Kasten 6.4-2	Praxisbeispiel: Nutzung alternativer Wasserressourcen für die Bewässerung des städtischen Grüns in Schweinfurt	176
Kasten 7.1-1	Die delegierte Verordnung (EU) 2023/707 der CLP-Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen	195
Kasten 7.1-2	Inhalte der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG)	196
Kasten 7.2-1	Antimikrobielle Resistenzen	198
Kasten 7.4-1	Ein schwankendes Wasserdargebot kann den Kraftwerksbetrieb gefährden	203
Kasten 7.4-2	Wasserbedarf des Energiesektors und Auswirkungen des Klimawandels	206
Kasten 7.5-1	Beispiel: Das Pestizid Chlorpyrifos	210
Kasten 8.1-1	Das Menschenrecht auf Wasser als Teil des Menschenrechts auf eine gesunde Umwelt	224
Kasten 8.1-2	FAO-Prozess zu Wasserbesitzverhältnissen	226
Kasten 8.1-3	Beispiel für regionale Governanceplattformen: Sendai Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge	229
Kasten 8.1-4	Positivbeispiel Mekong-Vertrag	230
Kasten 8.2-1	UNECE-Wasserkonvention: Protokoll zu „Wasser und Gesundheit“	234
Kasten 8.2-2	Wassermanagement in der Landwirtschaft Usbekistans	236
Kasten 8.2-3	Wassernutzerverbände in Indien	237
Kasten 8.2-4	Formen der Selbstverwaltung von Wassermanagement in Europa	238
Kasten 8.2-5	Wasser- und Sanitärversorgung in Simbabwe	238
Kasten 8.2-6	Bürgerbeteiligung und die Förderung von Selbstorganisation	241

Kasten 8.3-1	EU-Taxonomie für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten in Bezug auf Wasser- und Meeresressourcen	246
Kasten 8.3-2	Handelssysteme zur Reduktion von Nährstoffeinträgen in Gewässer und Finanzierung naturbasierter Lösungen	251
Kasten 8.3-3	Blended Finance: Definition, typische Strukturen und Herausforderungen	253
Kasten 8.4-1	Demokratienschutz und -förderung durch internationale Wissenschaftskooperationen zu Wasser	255
Kasten 8.4-2	Beispiele erfolgreicher Citizen Labs	256

Tabellen

Tabelle 2.1-1	Ökosystemleistungen von Süßwasserökosystemen	32
Tabelle 2.3-1	Weltweite Todesfälle durch unzureichende Sanitärverhältnisse und Trinkwasserverschmutzung	47
Tabelle 4.1-1	Auswahl weltweit auftretender regionaler Wassernotlagen	100
Tabelle 4.6-1	Folgen von Dürre und Trockenheit in Kalifornien	128
Tabelle 4.6-2	Veränderung der Gesamtwassermenge der großen Grundwasseraquifere der Welt	130
Tabelle 4.7-1	Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension: Risiken, Maßnahmen sowie überregionale und globale Handlungsbedarfe	133
Tabelle 6.2-1	Ausgewählte Ökosystemtypen mit Beispielen für Renaturierungsmaßnahmen	156
Tabelle 6.3-1	Beispiele für wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen in fünf Kategorien	165
Tabelle 6.4-1	Beispiele für Maßnahmen, die für eine wassersensible Stadtentwicklung geeignet sind	173
Tabelle 8.1-1	Übersicht der Schnittstellen von Wassergovernance zu laufenden Prozessen der internationalen Umweltpolitik	222
Tabelle 8.2-1	Dialogforen zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension	240
Tabelle 8.3-1	Wasserbezogene Risikofaktoren, die bei Unternehmenswerten zu Verlusten führen und sie zu Belastungen machen kann	244
Tabelle 8.3-2	Potenzielle Barrieren für die Umsetzung naturbasierter Lösungen für verbesserte Wassersicherheit, nach Akteuren des Wassersektors und Möglichkeiten diese Barrieren zu beseitigen	252

Abbildungen

Abbildung 1	Geographische Lage der im Gutachten behandelten regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension.	6
Abbildung 2	WBGU-Konzept zu Grenzen der Beherrschbarkeit.	8
Abbildung 3	Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie	16
Abbildung 4	WBGU-Vorschlag für eine Water Mapping Initiative zur Vermeidung drohender regionaler Wassernotlagen	17
Abbildung 2.1-1	Der Einfluss natürlicher Infrastrukturen auf die Wassersicherheit	31
Abbildung 2.2-1	Der Wasserkreislauf einschließlich direkter menschlicher Eingriffe.	33
Abbildung 2.2-2	Aufteilung von Niederschlag in grünes und blaues Wasser	34
Abbildung 2.2-3	Nigeria als produzierendes und empfangendes Gebiet von Feuchtigkeit und Verdunstung	35
Abbildung 2.2-4	Globaler Überblick über das Auftreten von Sturzfluten	37
Abbildung 2.3-1	Ströme virtuellen blauen Wassers durch den Handel mit Nahrungsmitteln (1996–2005)	41
Abbildung 2.3-2	Multidimensionaler Armutsindex, global 2010–2020	43
Abbildung 2.3-3	Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu Trinkwasserversorgung nach Region und Einkommensklasse (2022)	43
Abbildung 2.3-4	Anteil der Oberflächengewässer in Europa, die keinen guten chemischen Status erreichen	44
Abbildung 2.3-5	Luft, Land- und Wasserverschmutzung: wesentliche Belastungspfade.	46
Abbildung 2.3-6	Simulation der Stickstoffbelastung in den großen Flusseinzugsgebieten der Welt	47
Abbildung 2.3-7	Wasserknappheitsfußabdruck der Abbauprozesse von Rohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien	49
Abbildung 2.4-1	Internationale Leitbilder für Wassergovernance im Überblick	50
Abbildung 2.4-2	Politikzyklus mit Planungs- und Implementierungsphasen von Integriertem Wasserressourcenmanagement (IWRM)	52
Abbildung 2.4-3	Umsetzung von Integriertem Wasserressourcenmanagement (IWRM) in einzelnen Ländern, gemessen anhand des SDG 6.5.1-Indikators im Jahr 2020	53
Abbildung 3-1	Verschärfungen wasserbezogener Probleme, wie sie in Kapitel 3 diskutiert werden.	66
Abbildung 3.1-1	Änderungen der Temperatur des heißesten Tages des Jahres	67
Abbildung 3.1-2	Änderungen des Niederschlags am regenreichsten Tag des Jahres	68
Abbildung 3.1-3	Änderungen der jährlichen mittleren Bodenfeuchte	69
Abbildung 3.1-4	Auswirkungen von Gletscherschmelze	71
Abbildung 3.1-5	Zukünftige Änderungen der Abflüsse	72
Abbildung 3.1-6	Änderungen extremer Dürren	73
Abbildung 3.1-7	Dürretypen und ihre Auswirkungen	77
Abbildung 3.1-8	Dürreereignisse: Dynamiken	78
Abbildung 3.1-9	Wasserverschmutzung	79
Abbildung 3.2-1	Räumliche und zeitliche Darstellung der Einflussfaktoren sich verändernder Wasserknappheit	82

Abbildung 3.2-2	Prognose virtueller Wasserexporte auf Ebene von Flusseinzugsgebieten in 2050 und 2100	84
Abbildung 3.2-3	Die Beziehung zwischen dem Süßwasser-Status (Kombination aus Süßwasser-Stress und Speichertrend pro Einzugsgebiet) eines Einzugsgebiets und der sozialen Anpassungsfähigkeit	86
Abbildung 3.2-4	Modellierter Wasserverbrauch in Kapstadt nach gesellschaftlichen Gruppen.	87
Abbildung 3.3-1	Konzeptionelle Darstellung von globalen Bedrohungen für Süßwasserökosysteme	89
Abbildung 3.3-2	Trends in der globalen Biodiversität ausgehend von einer Basislinie von 1970	91
Abbildung 4.1-1	Geographische Lage der behandelten regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension	99
Abbildung 4.2-1	Globale Übersicht zur Wasserknappheit in Städten	102
Abbildung 4.3-1	Prognostizierte Niederschlagsänderungen und Wasserverbrauch der Landwirtschaft in der MENA-Region	109
Abbildung 4.3-2	Virtueller Wasserhandel in der MENA-Region im Jahr 2015	110
Abbildung 4.4-1	Die Flusseinzugsgebiete und Bevölkerung der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region	113
Abbildung 4.4-2	Vulnerabilität, Bedeutung für die Wasserversorgung und projizierte Veränderungen der wichtigsten kryosphärischen Wassertürme und zugehörigen Flussbecken jedes Kontinents	114
Abbildung 4.4-3	Relative Änderungen des mittleren Jahresabflusses in den Flussbecken der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region bei unterschiedlich starker Erwärmung	115
Abbildung 4.4-4	Zukünftige Veränderungen des menschlichen Wasserbedarfs in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region	116
Abbildung 4.4-5	Anteil in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Großregion produzierter Lebensmittel an der globalen Lebensmittelproduktion	117
Abbildung 4.5-1	Zukünftige Verschmutzung von Oberflächengewässern in Subsahara-Afrika und Anzahl der betroffenen Menschen	121
Abbildung 4.5-2	Anteil der Bevölkerung verschiedener Weltregionen, der Ende des Jahrhunderts von Wasserverschmutzung betroffen sein wird	122
Abbildung 4.6-1	Entwicklung von Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch in Kalifornien 1923–2018	126
Abbildung 4.6-2	Jährliche Abweichungen von Lufttemperaturen in Kalifornien vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1981–2000	126
Abbildung 4.6-3	Grundwasserrückgang im Central Valley	127
Abbildung 4.6-4	Wasserdargebot aus Oberflächengewässern und Zufluss bzw. Verlust der Grundwassermenge im Central Valley 2002–2022	127
Abbildung 5.1-1	WBGU-Konzept zu Grenzen der Beherrschbarkeit	136
Abbildung 6.1-1	Kontinuum zwischen Fehlanpassung bis hin zu transformativer Anpassung mit Beispielen für wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen	145

Abbildung 6.1-2	Mögliche Kategorisierung nicht intendierter Konsequenzen nach Absehbarkeit und Vermeidbarkeit	152
Abbildung 6.2-1	Beispiel für ein renaturiertes Feuchtgebiet in Texas (USA)	158
Abbildung 6.2-2	Beispiel für den Rückbau großer Staudämme (Elwha River, USA)	161
Abbildung 6.3-1	Beispiele für Agroforstwirtschaft	164
Abbildung 6.3-2	Heutige und zukünftige Wirksamkeit wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft	166
Abbildung 6.3-3	Grundidee von Green Water Credits	168
Abbildung 6.4-1	Strategien zur Anpassung urbaner Wasserinfrastruktur an den Klimawandel	170
Abbildung 6.4-2	Der „Wolkenbruchplan“ in Kopenhagen als Beispiel für blau-grüne Infrastruktur in Städten	175
Abbildung 6.4-3	Verteilung des recycelten Nutzwassers in Schweinfurt (Unterfranken)	177
Abbildung 7.1-1	Ansätze zur Ausgestaltung und konkreten Umsetzung von Zero Pollution	192
Abbildung 7.1-2	Inhalte der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie	196
Abbildung 7.2-1	Übertragung und Verbreitung von antimikrobiellen Resistenzen über die Umwelt	199
Abbildung 7.4-1	Verbrauch blauen Wassers durch verschiedene Kraftwerkstypen über ihren Lebenszyklus	207
Abbildung 7.4-2	Rohstoffrückgewinnung aus Industrieabwässern	208
Abbildung 8-1	Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie	216
Abbildung 8.1-1	Globaler Status der Zielerreichung von SDG 6	218
Abbildung 8.1-2	Wasserpolitische Governanceprozesse 2023–2028	220
Abbildung 8.1-3	Schnittstellen einer zu entwickelnden Internationalen Wasserstrategie	221
Abbildung 8.1-4	Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie mit Governance zu blauem und grünem Wasser	221
Abbildung 8.3-1	Ausgewählte Handlungsfelder bei der Finanzierung wasserbezogener Investitionen	243
Abbildung 8.4-1	WBGU-Vorschlag für eine Water Mapping Initiative zur Vermeidung regionaler Wassernotlagen	259

Akronyme

AMR	Antimikrobielle Resistenzen
ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
ASEAN	Association of South East Asian Nations <i>Verband Südostasiatischer Nationen</i>
AU	Afrikanische Union
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
BSB/BOD	Biochemical Oxygen Demand <i>Biochemischer Sauerstoffbedarf</i>
CBD	Convention on Biological Diversity <i>Biodiversitätskonvention, auch: Übereinkommen über die biologische Vielfalt</i>
CCS	Carbon Capture and Storage <i>CO₂-Abscheidung und -Speicherung</i>
CLP	Classification, Labelling and Packaging <i>Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung</i>
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Conference of the Parties <i>Vertragsstaatenkonferenz</i>
CWIS	Citywide Inclusive Sanitation <i>Stadtweite inklusive Sanitärversorgung</i>
DALYs	Disability-adjusted life years <i>Messgröße der Krankheitslast</i>
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DüV	Düngeverordnung
EIB	Europäische Investitionsbank
ESAP	European Single Access Points <i>Zentrales Europäisches Zugangsportal</i>
ESRS	European Sustainability Reporting Standards <i>Europäische Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung</i>
EU	Europäische Union
EuGH	Europäischer Gerichtshof
EZB	Europäische Zentralbank
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations <i>Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen</i>

Akronyme

FC	Fecal Coliform <i>Konzentration coliformer Bakterien</i>
FSM	Fäkalschlamm-Management
G7	Gruppe der Sieben (Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Vereinigtes Königreich, Vereinigte Staaten)
G20	Gruppe der Zwanzig (Industrielländer der G7, Schwellenländer der O-5, EU)
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GBF	Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework <i>Globaler Biodiversitätsrahmen von Kunming-Montreal</i>
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GG	Grundgesetz
GWL	Global Warming Level <i>Globale Erwärmungsstufe</i>
GWP	Global Water Partnership <i>Globale Wasserpartnerschaft</i>
HICs	High-Income Countries <i>Hocheinkommensländer</i>
HKH	Hindukusch-Karakorum-Himalaya
HQ ₁₀₀	100-jährliches Hochwasser
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services <i>Zwischenstaatliches Gremium zur wissenschaftlichen Politikberatung zu den Themen biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen (auch Weltbiodiversitätsrat)</i>
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change <i>Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen</i>
IWRM	Integrated Water Resources Management <i>Integriertes Wasserressourcenmanagement</i>
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleinere und Mittlere Unternehmen
LDCs	Least Developed Countries <i>Am wenigsten entwickelte Länder</i>
Li ₂ CO ₃	Lithiumcarbonat
LiOH	Lithiumhydroxid
LMICs	Low- and middle-income countries <i>Länder niedrigen und mittleren Einkommens</i>
MENA	Middle East and North Africa <i>Naher/Mittlerer Osten und Nordafrika</i>
MRC	Mekong River Commission <i>Mekong-Flusskommission</i>
NAMs	New Approach Methodologies <i>Neuartige Methodiken (Bundesinstitut für Risikobewertung)</i>
NAPs	National Adaptation Plans <i>Nationale Anpassungspläne</i>
NbS	Nature-based Solutions <i>Naturbasierte Lösungen</i>
NDCs	Nationally Determined Contributions <i>National festgelegte Beiträge</i>
NGO	Non-Governmental Organization <i>Nichtregierungsorganisation</i>
NOx	Stickstoffoxide
ODA	Official Development Assistance <i>Öffentliche Entwicklungszusammenarbeit</i>
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development <i>Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung</i>

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBT	Persistent, bioakkumulativ und toxisch
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PM	Particulate matter <i>Feinstaub</i>
PMT	Persistent, mobil und toxisch
PPPs	Public-Private-Partnerships <i>Öffentlich-private Partnerschaften</i>
PV	Photovoltaik
RCP	Representative Concentration Pathway <i>Repräsentativer Konzentrationspfad</i>
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals <i>Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe</i>
SDGs	Sustainable Development Goals <i>Ziele für nachhaltige Entwicklung</i>
SSP	Shared Socioeconomic Pathway <i>Gemeinsam Genutzter Sozioökonomischer Pfad</i>
TDS	Total Dissolved Solids <i>Menge der im Wasser gelösten Feststoffe</i>
THG	Treibhausgase
TWS	Total Water Storage <i>Gesamtwasserspeicherung</i>
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations <i>Vereinte Nationen</i>
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification <i>Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (auch Desertifikationskonvention)</i>
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development <i>Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung</i>
UNDP	United Nations Development Programme <i>Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen</i>
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe <i>Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen</i>
UNEA	United Nations Environment Assembly <i>Umweltversammlung der Vereinten Nationen</i>
UNEP	United Nations Environment Programme <i>Umweltprogramm der Vereinten Nationen</i>
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization <i>Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur</i>
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change <i>Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (auch Klimarahmenkonvention)</i>
UNGA	General Assembly of the United Nations <i>Generalversammlung der Vereinten Nationen</i>
UN Habitat	United Nations Human Settlements Programme <i>Programm der Vereinten Nationen für menschliche Siedlungen</i>
UN-ESCWA	Economic and Social Commission for Western Asia <i>Wirtschafts- und Sozialkommission für Westasien</i>
UNICEF	United Nations Children's Fund <i>Kinderhilfswerk der Vereinten Nationen</i>
WEF	World Economic Forum <i>Weltwirtschaftsforum</i>

Akronyme

WEFE	Water-Energy-Food-Ecosystem <i>Wasser-Energie-Landwirtschaft-Ökosystem</i>
WHO	World Health Organization <i>Weltgesundheitsorganisation</i>
WTO	World Trade Organization <i>Welthandelsorganisation</i>
WWF	World Wide Fund For Nature <i>Weltweiter Fonds für die Natur</i>

Zusammenfassung

In einer klimatisch und geopolitisch aufgeheizten Welt verschärfen sich die Herausforderungen um Wasser substanziell. Unsicherheit wird Normalität, Grenzen der Beherrschbarkeit könnten überschritten werden. Notwendig ist ein klimaresilientes Wassermanagement mit langfristigem Blick, das blaues und grünes Wasser zusammendenkt und flexibel auf Veränderungen reagieren kann. Es muss vorhandene selbstorganisierte Strukturen einbeziehen und benötigt eine begleitende Wissenschaft. Eine Internationale Wasserstrategie mit regionalen Plattformen sollte entwickelt werden.

Wo Wasser ist, ist Leben. Wasser ist mächtig und fragil – Konfliktgegenstand und einendes Medium zugleich. In Zukunft ist mit fortschreitenden, beschleunigten Änderungen des globalen Wasserkreislaufs zu rechnen. Auswirkungen des Klimawandels, die Übernutzung der Wasserressourcen, die ungleiche Verteilung von Wasser, der Verlust von Ökosystemleistungen sowie Gefährdungen durch wasserbezogene Gesundheitsrisiken werden sich weiter verschärfen. Die Annahme von Stationarität, also die Vorstellung, dass natürliche Systeme auf der Grundlage empirischer Beobachtungen innerhalb eines definierten Zeitfensters eine vorhersagbare Variabilität aufweisen, ist angesichts des Klimawandels nicht mehr tragfähig. Dies wird zunehmend in Bedrohungslagen münden, die jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums liegen und sich zu regionalen Wassernotlagen zuspitzen können. Im Extremfall ergeben sich Situationen, in denen Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten, gesellschaftliche Strukturen und Ökosysteme substanziell destabilisiert werden und Handlungsspielräume nicht mehr existieren. Dies sind bedrohliche Muster mit planetarer Dimension.

Um krisenhafte Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension abzuwenden, sollte international eine Water Mapping Initiative initiiert werden, bestehend aus einer Wissenschaftsplattform und einem Expert:innengremium. Zudem sollte ein systematischer internationaler Austausch

über wirkungsvolle Anpassungs- und Resilienzstrategien erfolgen. Anzustreben ist eine Internationale Wasserstrategie, um diesen Herausforderungen, vor denen alle Staaten stehen, als Weltgemeinschaft zu begegnen.

Von zentraler Bedeutung ist ein klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement weltweit, bei dem sich Infrastrukturen und Managementansätze den Veränderungen der lokalen Wasserhaushalte und zunehmenden Extremereignissen anpassen. Dies umfasst auch den Schutz der Wasserqualität durch eine konsequente Umsetzung des Zero-Pollution-Ansatzes und des Leitbilds einer Kreislaufwasserwirtschaft, unter Einbeziehung der Ökosysteme und einer aktiven Bewirtschaftung des im Boden gebundenen grünen Wassers.

Nachhaltige Wasserpolitik kann zudem nur gelingen, wenn auch in anderen Politikfeldern Fortschritte erzielt werden. Eine stringente Klimaschutzpolitik, Raumplanung für die Erhaltung und Renaturierung von Ökosystemen sowie die Umsetzung der internationalen Biodiversitätsziele sind unbedingte Voraussetzung, um Handlungsspielräume zu bewahren. Sie müssen eng verbunden sein mit globaler Sozial-, Wirtschafts- und Handelspolitik, um eine friedliche „WasserZukunft“ zu ermöglichen. Um die Anpassung an ein verändertes Wasserdargebot und zunehmende Extremereignisse finanzieren zu können, müssen private Investitionen mobilisiert und öffentliche Einnahmen stabilisiert werden. Der Zugang zu Finanzierung sollte auch für lokale Akteure verbessert werden.

Eine wichtige Ressource, um klimaresilientes Wassermanagement zu ermöglichen, ist die Wissenschaft. Sie ist gefordert, Erfahrungswissen durch Projektionen zukünftiger Veränderungen und ihrer Unsicherheiten zu ergänzen. Gleichzeitig müssen innovative Ansätze für den Umgang mit großskaligen und disruptiven Änderungen der Wasserverfügbarkeit und zunehmenden Extremereignissen entwickelt und wissenschaftlich begleitet werden. Entscheidungsabläufe können dafür durch die Bereitstellung von Echtzeitdaten und Prognosen beschleunigt werden.

Eine nachhaltige WasserZukunft setzt voraus, dass Ziele und Verantwortung nicht allein vom Staat getragen werden, sondern ebenso von Wirtschaft und Gesellschaft. Der Staat muss dafür die Voraussetzungen schaffen und einen politischen und regulierenden Rahmen setzen, der selbstorganisierte Strukturen fördert und eine Bildungsoffensive für einen verantwortlichen Umgang mit Wasser unterstützt. Wasser als wertvolle Ressource sollte konsequent und sozial ausgewogen bepreist werden, um weltweit eine effiziente und nachhaltige Nutzung zu fördern.

Es ist daher von höchster Dringlichkeit, das Thema Wasser höher auf der internationalen Agenda zu verankern. Das derzeitige starke Momentum durch die UN-Wasserkonferenzen 2023, 2026 und 2028 sollte von den Regierungen genutzt werden, um weltweit durch umfassende Vorsorge einen ausreichenden Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit einzuhalten. Kurzfristig sollten effektive Strategien für ein resilientes Wassermanagement entwickelt werden, die mittelfristig die weltweite Kooperation stärken und langfristig in ein von der Staatengemeinschaft getragenes Wasserabkommen münden.

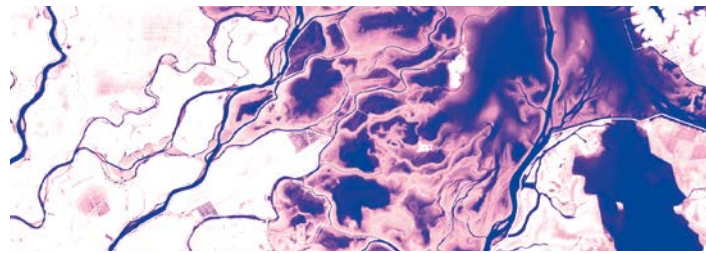
Die internationale Wasserpolitik muss sich auf die fortschreitenden und beschleunigten Änderungen im globalen Wasserkreislauf einstellen. Dazu sollte Wasser als Querschnittsthema in vielen Foren mit bedacht werden, braucht aber auch einen eigenen Prozess und politische Aufmerksamkeit. Der WBGU empfiehlt, bis 2030 eine Internationale Wasserstrategie zu erarbeiten. Ziele und Maßnahmen der Strategie sollten auch in zwischenstaatliche Wirtschafts- und Handelsbeziehungen einfließen, um Synergien zwischen dem Schutz der Wasserressourcen sowie der Unterstützung von klimaneutraler Entwicklung und Ernährungssicherheit zu ermöglichen. Die Strategie sollte langfristig zu einem eigenen internationalen Abkommen für Wasser – vergleichbar den Rio-Konventionen – weiterentwickelt werden.

Kasten 1 zeigt die Kernbotschaften des WBGU im Überblick.

Kasten 1

Kernbotschaften

- Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit wahren
- Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension antizipieren und abwenden
- Klimaresilientes Wassermanagement umsetzen und naturnahe Wasserqualität erhalten
- Integrierte Klima- und Biodiversitäts- und Sozialpolitik sind effektive Wasserpolitik
- Transformatives WasserWissen: Vorausschauende und begleitende Wissenschaft praktizieren
- Mit der Gesellschaft, nicht gegen sie: der gestaltende Staat und die selbstorganisierte Gesellschaft in der Verantwortung
- Internationale Verantwortung übernehmen – Internationale Wasserstrategie entwickeln
- Nationale Wasserstrategie in den internationalen Diskurs zu Wasser einbringen



Heutiger Umgang mit Wasser

Wasser durchläuft auf der Erde einen kontinuierlichen, globalen Kreislauf, der in Form von Niederschlägen über Land immer wieder neu Süßwasser zur Verfügung stellt. Dieses steht in der Folge als blaues oder grünes Wasser zur Verfügung: Blaues Wasser umfasst alle Wasserressourcen in Flüssen, Seen, Talsperren und Grundwasser. Grünes Wasser bezeichnet das im Boden gebundene Wasser; es kann durch Pflanzen produktiv die Bildung von Biomasse befördern (Rockström et al., 2023b). Ökosysteme mit ihrer Biodiversität sind ein wichtiger Teil des globalen Wasserkreislaufs. Der Mensch beeinflusst den natürlichen Wasserkreislauf durch Wasserentnahmen, -nutzungen und -ableitungen regional und global mittlerweile in einem großen Ausmaß, wodurch sich Verdunstung, Niederschläge, Grundwasserneubildung, Abflussverhalten, Wasserqualität usw. verändert haben und weiter verändern. Zudem ist bereits heute

ein massiver Einfluss von Klimawandel und Ökosystemdegradation spürbar.

Global entfallen 72 % aller Süßwasserentnahmen auf die Landwirtschaft, 15 % auf die Industrie und 13 % auf Kommunen und Haushalte (AQUASTAT, 2024). Der Anteil der Wasserentnahme für die Landwirtschaft an der Gesamtentnahme variiert jedoch regional und nach Einkommensniveau erheblich. In Hocheinkommensländern sind es im Durchschnitt nur 41 % der gesamten Entnahmen, in Ländern mit mittleren und niedrigen Einkommen dagegen 80–90 % (Ritchie und Roser, 2017). Die Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft, deren Fläche sich von 1961–2018 mehr als verdoppelt hat (UNESCO, 2024), und der Wasserbedarf einer wachsenden Stadtbevölkerung haben in vielen Regionen und Städten der Welt zur einer Übernutzung von nicht erneuerbarem Grundwasser (Tiefengrundwasser) und einer zunehmenden Absenkung des Grundwasserspiegels geführt. Besonders betroffen sind der Nahe und Mittlere Osten, Nordafrika, Indien, Nordchina sowie der Südwesten der USA. In den meisten dieser Regionen machte der Wasserverbrauch für Bewässerung der Landwirtschaft von 1960–2010 durchschnittlich über 90 % des gesamten Wasserkonsums aus. Mindestens etwa die Hälfte davon stammte aus nicht erneuerbarem Grundwasser (Wada und Bierkens, 2014).

Rund 2,2 Mrd. Menschen haben keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser – vor allem Länder niedrigen und mittleren Einkommens sind betroffen (UNESCO, 2024). Dabei ist vor allem in ländlichen Gebieten die Versorgungslage schwierig: Dort haben vier von fünf Menschen keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser. Rund 3,5 Mrd. Menschen haben keinen Zugang zu angemessener sanitärer Versorgung. Mittel der öffentlichen Entwicklungsleistungen (ODA) für den Wassersektor lagen im Jahr 2022 mit 9,1 Mrd. US-\$ mehr als 4 % unter ihrem Maximum von 2018 (UN Water, 2024).

Zwischen 2002 und 2021 waren 1,6 Mrd. Menschen von Überflutungen betroffen, und rund 100.000 verloren ihr Leben. Im gleichen Zeitraum litten 1,4 Mrd. Menschen unter Dürren, mit rund 21.000 Toten (UNESCO, 2024). Rund die Hälfte der Weltbevölkerung leidet derzeit zumindest einen Teil des Jahres unter schwerem Wassermangel (IPCC, 2023a).

In vielen Regionen der Erde hat sich die Gewährleistung einer sicheren Wasserver- und -entsorgung deutlich verbessert, aber ein substanzieller Anteil der Weltbevölkerung hat weiterhin keinen adäquaten Zugang zu diesen Dienstleistungen: Für mindestens 3 Mrd. Menschen ist die Wasserqualität wegen mangelnder Überwachung ungewiss (UN, 2022). Eine Gefährdung durch pathogene Mikroorganismen im Trinkwasser betrifft immer noch 2 Mrd. Menschen weltweit.

Neben den Wirkungen vor Ort kann es über den Handel mit Gütern, für deren Herstellung Wasser benötigt wird, auch zu Fernwirkungen (Telecoupling) kommen. Das zur Herstellung von Gütern benötigte und das in den Gütern enthaltene Wasser lassen sich als virtuelle Wasserströme über den Globus verfolgen. Etwa 65–90 % der weltweiten Ströme virtuellen Wassers stammen aus dem Handel mit Agrarprodukten, gefolgt mit deutlichem Abstand von der Industrie und dem Energiesektor. Besonders Länder mit hohen Agrarexporten führen somit indirekt das eigene Wasser aus.

Wasser wird vielerorts verschwendet, übernutzt und ungerecht verteilt. Nutzungsmuster sind durch politische Rahmenbedingungen und die existierende Wasserinfrastruktur geprägt – dabei gibt es starke Pfadabhängigkeiten, die Kurskorrekturen und substanzielle Veränderungen erschweren.



Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

Menschheit, Ökosysteme und der Planet bewegen sich in eine Zukunft, in der die für Mensch und Natur verfügbaren Wassermengen und Wasserqualitäten einem zunehmenden Wandel unterliegen. Insbesondere durch den Klimawandel ist die Annahme von Stationarität nicht mehr tragfähig.

Klimawandel und Verschmutzung

Der Klimawandel intensiviert den globalen Wasserkreislauf: Die Verdunstung von Wasser aus der Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen steigt, wie auch die in der Luft gespeicherte Menge an Wasser – pro 1 °C Erwärmung kann die Luft 7 % mehr Wasser speichern. In der Folge sind mehr und stärkere Niederschlagsereignisse möglich.

Die fortschreitende Erwärmung treibt globale und regionale Veränderungen von Niederschlag und Verdunstung voran, verschiebt das Gleichgewicht von gefrorenem zu flüssigem Wasser, erhöht den Wassergehalt in der Atmosphäre und führt zu einer Zunahme von Extremereignissen wie Überflutungen oder Dürren. Eine Milliarde Menschen leben derzeit küstennah und sind direkt vom zunehmenden Meeresspiegelanstieg und

entsprechend höher auflaufenden Sturmfluten betroffen (IPCC, 2019a). Im globalen Mittel nehmen die Niederschläge zu; jede weitere globale Erwärmung um 1 °C erhöht den mittleren Niederschlag weltweit um 1–3 %, wobei sich regional das Ausmaß und die Richtung der Änderungen und damit auch ihre Wirkungen stark unterscheiden. Im Vergleich zum Zeitraum 1995–2014 könnte die Niederschlagsmenge bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 13 % ansteigen. Da die Erwärmung zugleich auch zu einer potenziell höheren Verdunstung führt, ergeben sich regional unterschiedliche Auswirkungen auf das insgesamt verfügbare Wasser. Die Bodenfeuchte und damit das grüne Wasser wird in vielen Regionen verstärkt abnehmen – bei einer globalen Erwärmung um 4 °C könnte dies z. B. in Amazonien, dem südlichen Afrika und Westeuropa eine Minderung von bis zu 40 % bedeuten – in anderen Regionen wird sie weiter zunehmen. Als Reaktion auf den Klimawandel werden die Grundwasserentnahmen z. B. für Bewässerung voraussichtlich ansteigen und könnten die nicht erneuerbaren Grundwasseranteile weltweit erschöpfen. Die Kombination aus weiter steigenden Temperaturen, veränderten Niederschlagsmustern, zurückweichenden Gletschern und einer reduzierten Schneedecke führt dazu, dass die mittleren Abflussmengen mit fortschreitender globaler Erwärmung zunehmen, jedoch mit regional unterschiedlichen Ausprägungen. Zunehmende Abflussmengen werden insbesondere für die nördlichen hohen Breitengrade sowie Regionen in Zentral- und Ostafrika vorhergesagt, während Abnahmen im Mittelmeerraum sowie in Teilen Mittel- und Südamerikas insbesondere in den Sommermonaten zu erheblichen Verknappungen blauen Wassers führen werden (Douville et al., 2021).

Auch die Wasserqualität wird zukünftig weiter abnehmen, sofern die Einleitungen unzureichend geklärter Abwässer – aktuell betrifft dies etwa 80 % der weltweiten Abwässer – und damit von Krankheitserregern, schwer abbaubaren Chemikalien, Nährstoffen und festen Abfällen fortgesetzt werden. Dadurch werden Grundwasser, viele Süßgewässer, Küstenzonen und Meere für Tiere und Pflanzen zum Teil durch Sauerstoffmangel und Giftblüten unbewohnbar (dead zones); die Selbstreinigungskraft der Gewässer geht verloren. Durch moderne, neu entwickelte Stoffe sowie durch Stoffgemische und möglicherweise Wechselwirkungen mit z. B. sie umgebenden Mikroorganismen steigt die Komplexität der Verschmutzung (EEA, 2022). Die Langzeitriskien sind noch unbekannt und Gegenstand der aktuellen Forschung. Mikro- und Nanoplastik beispielsweise können als Vektor für zusätzliche schädliche Kontaminanten mit potenziell schweren Folgen für Umwelt und Gesundheit wirken. In einem Zukunftsszenario ohne Gegenmaßnahmen ist global bis zum Jahr 2060 eine Verdopplung des in die Umwelt eingebrachten Plastiks und somit auch

des Mikro- und Nanoplastiks auf 44 Mio. t pro Jahr zu erwarten (OECD, 2022b). Der Klimawandel verschärft die Situation zusätzlich: In Dürreperioden kann z. B. die Konzentration von Schadstoffen in Oberflächengewässern nicht mehr ausreichend verdünnt werden. Durch Überschwemmungen und das Abschmelzen von Schnee und Eis werden Schadstoffe mobilisiert und damit bioverfügbar. Steigende Wassertemperaturen während Hitzewellen beeinflussen die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Oberflächengewässern, die sich auf die Konzentration und die chemischen Eigenschaften transportierter Stoffe auswirken können. Insgesamt resultiert daraus zusammen mit dem ungebremsen Klimawandel eine extreme, kaum kontrollierbare Belastungssituation für die globalen Wasserressourcen.

Die Kapazität zur Anpassung nimmt mit fortschreitendem Klimawandel kontinuierlich ab – dies betrifft die Menschen, ihre technologischen und institutionellen Systeme sowie auch die der Natur (IPCC, 2022a). Um Anpassungsfähigkeit weitgehend zu erhalten, ist es nach dem Vorsorgeprinzip alternativlos, den Klimawandel bei 1,5 °C globaler Erwärmung zu begrenzen und langfristig – sofern möglich – sogar rückgängig zu machen. Dies erfordert die Beendigung anthropogener CO₂-Emissionen und die starke Minderung der Emissionen anderer Treibhausgase sowie die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre.

Sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen

Künftig wird ohne wirksame Gegenmaßnahmen je nach Region die Wassernutzung und damit die Gefahr der Übernutzung weiter wachsen. Die UNESCO (2023) schätzt, dass die globale Wassernachfrage jährlich um ca. 1 % steigen und damit bis 2050 um 20–30 % zunehmen wird. Allerdings beträgt die Fehlerspanne für diese Berechnung mehr als 50 %. Ein Großteil des erwarteten Anstiegs der Nachfrage entfällt auf Länder niedrigen und mittleren Einkommens, insbesondere Schwellenländer. Nachfragesteigerungen in den Kommunen und Haushalten sind am stärksten in solchen Regionen, in denen die Wasserver- und -entsorgung ausgeweitet wird. Zunahmen in der industriellen Wassernachfrage gehen in der Regel mit fortschreitender Industrialisierung einher, und können durch Effizienzverbesserungen in der Wassernutzung auch wieder sinken. Die Wassernachfrage in der Landwirtschaft ist vor allem durch die Bewässerung getrieben. Je nach zugrundeliegenden Annahmen über sozioökonomische, technische und klimatische Entwicklungen variieren Projektionen zur Entwicklung des Wasserbedarfs erheblich. Der IPCC schätzt, dass der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts auf das Doppelte bis Dreifache zunehmen könnte (Caretta et al., 2022).

Projektionen zeigen, dass steigende Bewässerungsbedarfe neben erhöhter Verdunstung infolge des Klimawandels zur zunehmenden Erschöpfung von Grundwasservorkommen bis zum Ende des Jahrhunderts beitragen.

Globale geopolitische und gesellschaftliche Entwicklungen kommen verschärfend hinzu. Mangelnde Wasserverfügbarkeit und Extremereignisse wie Dürren oder Überschwemmungen können Wachstum, Entwicklung und Armutsbekämpfung behindern. Multidimensionale Armut und soziale Ungleichheiten sowie Autokratisierungs- und Polarisierungsprozesse schwächen gesellschaftlichen Zusammenhalt, befördern die Fragmentierung von Governance-Systemen und mindern gesellschaftliche Widerstandsfähigkeit gegenüber wasserbezogenen Krisen wie Dürren und Überschwemmungen. Das Management von Wasser ist häufig eine Aufgabe, die politische Grenzen überschreitet, und wird daher ebenso wie wasserbezogene multilaterale Verhandlungen durch die gegenwärtigen geopolitischen Spannungen erschwert. Wasserkrisen gehen zudem häufig nicht auf fehlende Verfügbarkeit, sondern auf ungleiche Verteilung zurück. Klimatisch und ökologisch bedingte Verfügbarkeiten der Ressource und Verteilungsdefizite verstärken sich gegenseitig.

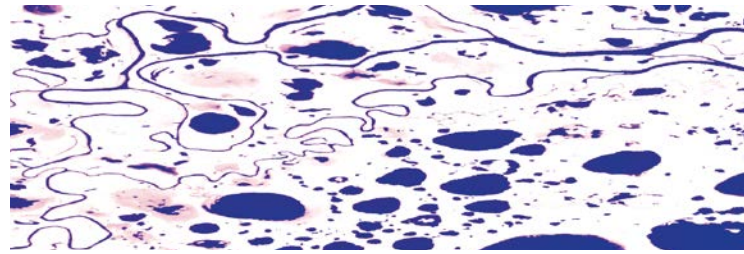
Gesundheitsschäden bei Arten, Ökosystemen und Menschen

Die zunehmende Klimakrise und Verschmutzung und ihre Auswirkungen auf hydrologische Prozesse und nicht zuletzt auf die Biodiversität werden direkte und indirekte Folgen für die menschliche Gesundheit sowie für die Gesundheit anderer Organismen haben. Dies hat Auswirkungen auf die Funktionalität und Artenzusammensetzung der Ökosysteme. Die Verfügbarkeit von Wasser ist grundlegend für Pflanzenwachstum – und damit für das Funktionieren von Ökosystemen wie Wäldern oder Graslandschaften. Umgekehrt sind gesunde Ökosysteme wesentlich für eine lokal stabile Süßwasserverfügbarkeit und -qualität. Wasser hat somit nicht nur eine Bedeutung für Biodiversität, sondern Biodiversität auch für Wasser.

Auch die Lebensbedingungen des Menschen können sich im Zusammenwirken der Klimafaktoren so ungünstig verändern, dass Lebensunterhalt und Ernährung vor Ort nicht mehr gewährleistet sind. Dabei sind Veränderungen der Wasserqualität und -quantität und der damit verbundene Mangel an gesundheitlich unbedenklichem Wasser nur ein Teil der Bedrohungslage. Wasserknappheit, Verschmutzung und Überschwemmungen wirken sowohl direkt als auch indirekt auf den Menschen. Sie können den dauerhaften Verlust der gesundheitlichen Unversehrtheit und einer hohen Anzahl an Menschenleben zur Folge haben. Auch soziale Gefüge und Gesundheitseinrichtungen können verloren gehen. Durch unregelmäßige bzw. unzureichende Wasserversorgung

werden nicht nur die Vitalität des Einzelnen und seine Leistungen in der Gesellschaft beeinträchtigt, sondern schließlich auch die Leistungsfähigkeit der Gesellschaft insgesamt, mit entsprechenden wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Konsequenzen.

Die sich abzeichnenden globalen Verschärfungen und ihr Zusammenwirken führen dazu, dass Notlagen entstehen können, die kaum noch durch den Menschen beherrschbar sind. Beispiele regionaler Wassernotlagen, die sich so oder ähnlich auch in anderen Weltregionen ereignen können, sind in Kasten 2 illustriert.



Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit sichern

Bei Wassernotlagen können Grenzen der Beherrschbarkeit erreicht werden, jenseits derer sich gesellschaftliche Strukturen und Ökosysteme destabilisieren: Menschen und Ökosystemen der betroffenen Region werden die Lebensgrundlagen entzogen (Kasten 2). Angesichts der prognostizierten klimatischen, ökologischen, sozioökonomischen und geopolitischen Entwicklungen ist zu erwarten, dass derartige Grenzzustände und regionale Wassernotlagen weltweit immer häufiger erreicht werden.

Um einen sicheren Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit zu halten, sind Maßnahmen auf globaler und lokaler bzw. regionaler Ebene erforderlich (Abb. 2):

Erstens müssen Verschärfungen in Grenzen gehalten werden, die als globale Treiber direkt auf den globalen Wasserhaushalt wirken: Dafür ist eine ambitionierte Klimapolitik einschließlich der Einhaltung der Ziele des Pariser Übereinkommens Voraussetzung, denn nur so können die Änderungen des globalen und lokalen Wasserhaushalts durch den Klimawandel begrenzt werden. Ebenso zentral ist die Umsetzung des Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework, um die elementare Rolle der Natur im globalen Wasserhaushalt zu schützen. Je früher gehandelt wird, desto mehr Handlungsoptionen bestehen.

Zweitens müssen regionale Wassernotlagen möglichst vermieden werden. Gelingt es nicht, die Verschärfungen wasserbezogener Probleme einzuhegen, steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens regionaler Wassernotlagen

Kasten 2

Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

Dürren und Extremniederschläge werden klimawandelbedingt weltweit zunehmen. Mit dem Abschmelzen von Gletschern wird sich vielerorts das Wasserdargebot massiv verändern. Hinzu kommen die Degradation und Zerstörung von Ökosystemen, die wertvolle Wasserspeicherung unterstützen, z. B. in Form von grünem Wasser. In einigen Weltregionen wird zudem die Wasserverschmutzung deutlich zunehmen. Diese Verschärfungen wasserbezogener Probleme können sich gegenseitig verstärken und mittel- und langfristig zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension zuspitzen. Das Ausmaß und die Dynamik dieser Wassernotlagen können bisher beherrschbare Risiken überschreiten. Der WBGU beschreibt hier exemplarisch fünf regionale Wassernotlagen, deren Muster sich auch in anderen Weltregionen wiederfinden.

Wasserknappheit in Städten



> 933 Mio.

Menschen sind heute in Städten von Wasserknappheit betroffen

30–50%

der Weltbevölkerung werden es 2050 sein

um 80%

wächst die urbane Wassernachfrage bis 2050

In den letzten 20 Jahren waren weltweit über 80 Metropolen bzw. Metropolregionen von schwerem Wassermangel betroffen (Rusca et al., 2023). Die Zahl der Berichte über Städte, denen das Wasser auszugehen droht, steigt. 2016 haben über 30 % der urbanen Bevölkerung in Gebieten mit Wasserknappheit gelebt. Mangel an Oberflächenwasser, Bodenversiegelung, Grundwasserübernutzung sowie der Anstieg des Wasserbedarfs durch (rasche) Verstädterung und steigenden Pro-Kopf-Bedarf sind

die Haupttreiber für urbanen Wassermangel. Leckagen in der Wasserinfrastruktur und Missmanagement verstärken die Wasserknappheit. Die Zahl der Menschen, die weltweit in Städten mit Wasserknappheit leben, könnte von mehr als 933 Mio. im Jahr 2016 auf 1,6–2,3 Mrd. Menschen im Jahr 2050 ansteigen; das wäre ein Drittel bis fast die Hälfte der globalen Stadtbevölkerung (He et al., 2021). Die Megacity São Paulo (Brasilien) erlebte 2014–2016 eine gravierende Wasserknappheit, Chennai (Indien) war 2019 als eine der niederschlagreichsten Megastädte der Welt von der massivsten Wasserknappheit seit 30 Jahren betroffen. Barcelona, Kapstadt, Bogotá, Montevideo und Mexiko-Stadt sind weitere Beispiele für Städte, in denen in jüngster Vergangenheit der Wassernotstand ausgerufen werden musste.

Zunahme von Dürren und Sturzfluten in der MENA-Region



6%

der Weltbevölkerung leben in der MENA-Region

nur 1%

der globalen Süßwasservorräte ist dort verfügbar

um 24%

sank die Pro-Kopf-Verfügbarkeit von erneuerbarem Süßwasser 2007–2018

Die MENA-Region (Mittlerer Osten, Nordafrika) wird im globalen Vergleich mit am stärksten von den negativen Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein (Hajat et al., 2023). Im Zeitraum von 2007–2018 ist die Verfügbarkeit von erneuerbarem Süßwasser pro Kopf in der Region um etwa 24 % gesunken (SIWI und UNICEF, 2023). Veränderte Niederschlagsmuster, zunehmende Trockenheit und Dürren, Starkregenereignisse und Sturzfluten sowie vor allem Übernutzung, begleitet von großen Governanceherausforderungen bei der gerechten Verteilung der wenigen verfügbaren Süßwasserressourcen, führen in der Region bereits heute zu Wasserknappheit und ungleicher Wasserverfügbarkeit für Mensch und Umwelt. Projektionen deuten darauf hin, dass in der MENA-Region zukünftig



Abbildung 1

Geographische Lage der im Gutachten behandelten regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension.
Quelle: WBGU

ein deutlich extremeres Klima zu erwarten ist. Hitzeextreme, mehr Trockenheit, länger anhaltende Dürren und mehr Starkregenereignisse werden gemeinsam mit dem zunehmenden Nutzungsdruck die Wasserknappheit in der Region zukünftig weiter ansteigen lassen, mit negativen Auswirkungen für Mensch und Natur. Dieser Trend ist auch ein globales Muster: In den Jahren 2022 und 2023 wurde in 22 Ländern weltweit der Dürrenotstand ausgerufen (UNCCD, 2023).

Gletscherschmelze in der Gebirgskette Hindukusch-Karakorum-Himalaya: Verlust natürlicher Wasserspeicher



2 Mrd.

Menschen beziehen Wasser aus den Flussbecken der Region

200 Mio.

Menschen leiden bereits unter erhöhtem Wasserstress

20% bis 65%

Gletscherverlust je nach Klimaszenario

Neben den Polen sind die Gletscher der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirgskette die größten gefrorenen Süßwasserspeicher der Erde. Die Flussbecken der Region versorgen fast 2 Mrd. Menschen mit Wasser, also ein Viertel der Weltbevölkerung. Bis 2100 wird auch ohne eine weitere Erwärmung ein Verlust von mehr als 20% der Eismasse und vergletscherten Fläche in der Gebirgskette projiziert, je nach Klimaszenario steigt dieser Anteil auf bis zu 65%. Bereits heute leiden fast 200 Mio. Menschen in der Region an Wasserstress (Nie et al., 2021) und es ist damit zu rechnen, dass sich die Lage bis Ende des Jahrhunderts weiter zuspitzen wird. Ein vermindertes Wasserangebot, insbesondere in Flussbecken wie dem Indus, die zu hohen Anteilen von Schmelzwasser gespeist sind, trifft auf einen steigenden Wasserbedarf. Diese Entwicklung birgt ein erhebliches Destabilisierungspotenzial: z. B. kann erhöhter Wasserstress für Menschen und Ökosysteme zu gesellschaftlichen und geopolitischen Konflikten führen, zunehmende Naturgefahren eine Bedrohung für Menschenleben und Infrastruktur darstellen und verminderte Abflüsse in den Sommermonaten nicht nur die regionale, sondern auch die globale Lebensmittelproduktion beeinträchtigen. Aus der Region stammen 61% der globalen Reisernte, 41% der globalen Kartoffelproduktion und 24% der globalen Maisernte (Hu und Tan, 2018). Abschmelzende Gletscher bergen auch in anderen Regionen der Welt wasserbezogene Gefahren; besonders betroffen sind z. B. die südlichen Anden, Westkanada und die westlichen USA (insbesondere Alaska) oder die Alpen.

Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika



2,7 Mrd.

Menschen sind heute von organischer Wasserverschmutzung betroffen

auf 4,2 Mrd.

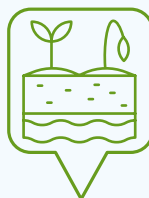
könnte ihre Zahl bis 2100 ansteigen

38%

der von organischer Wasserverschmutzung betroffenen Weltbevölkerung wird 2100 in Subsahara-Afrika leben

Global könnte sich die Zahl der Menschen, die von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffenen sind, von heute 2,7 Mrd. auf bis zu 4,2 Mrd. Menschen zum Ende des Jahrhunderts erhöhen. Für die Belastung durch pathogene Mikroorganismen, Salze und Nährstoffe werden ähnliche Muster prognostiziert (Jones et al., 2023). Dies betrifft besonders Subsahara-Afrika: Bis Ende des Jahrhunderts werden voraussichtlich 25% aller Menschen in Afrika leben, aber 38% der weltweit von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffenen Menschen. Pathogene Mikroorganismen stellen eine direkte Gefahr für die menschliche Gesundheit dar, organische Kohlenstoffverbindungen fördern in Oberflächengewässern mikrobielles Wachstum und Sauerstoffzehrung, die zu Fischsterben führen. Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor verursachen Eutrophierung, Algenblüten und den Verlust von Habitaten und Biodiversität. Neben Subsahara-Afrika zeichnen sich auch in Zentral- und Nordwestmexiko, in Nordindien sowie in Ostchina globale Schwerpunkte der Wasserverschmutzung ab.

Übernutzung des Grundwassers und Klimawandel im Central Valley (USA)



25%

der Obst- und Nussproduktion der USA stammen aus dem Central Valley

10%

sind die erwarteten Wasserverluste in der Region bis 2030

75%

der Brunnen erlitten eine Grundwasserabsenkung um 1,5 m (2018–2023)

Das Risiko lokaler Wasserengpässe hat sich in den letzten Jahrzehnten im Central Valley durch eine steigende Nachfrage und den Klimawandel deutlich zugespitzt. Im mehrjährigen Mittel überstieg der Grundwasserverlust die Rate der Neubildung. In der Folge erlitten 2018–2023 mehr als 75% der Brunnen eine Grundwasserspiegelabsenkung um mehr als 1,5 m (CNRA, 2023). Die Aufrechterhaltung der Trinkwasserversorgung gestaltet sich angesichts hoher Verbräuche und häufigerer Trockenperioden als immer herausfordernder. Eine Entspannung der Lage ist nicht abzusehen. Das Central Valley ist als grundwasserabhängige und semiaride Region weltweit jedoch nicht die einzige, in der sich lokal eine Erschöpfung der erneuerbaren Grundwasserressourcen mit weitreichenden Folgen für Mensch und Natur abzeichnet. Auch der Nordosten Chinas (Hai-He-Becken und Aquifer der Nordchinesischen Ebene), der Norden Indiens (Ganges-Brahmaputra-Aquifer), der Nordosten Südamerikas (São-Francisco-Becken), der Südwesten und Süden der USA (Central und South High Plains), Osteuropa (Don- und Dnepr-Becken) oder der Nahe Osten (Arabische Halbinsel, Iran) geraten durch jahrelange intensive Bewirtschaftung und die Folgen der Erderwärmung an die Grenzen ihrer natürlichen Belastbarkeit.

Zusammenfassung

mit planetarer Dimension. Zu ihrer Abwehr bedarf es transformativer Anpassungsmaßnahmen und eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements mit transformativer Eingriffstiefe, da bisherige (inkrementelle) Anpassungsmaßnahmen nicht mehr ausreichen werden. Konkret bedeutet dies die Bereitschaft zu radikaler Umsteuerung, insbesondere durch die Gestaltung eines Strukturwandels, etwa in der Landnutzungs-, Industrie-, Siedlungs- und Infrastrukturpolitik – national wie im Rahmen internationaler Zusammenarbeit.

Da ein sicherer Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit nicht immer eingehalten werden kann, müssen gefährdete Regionen frühzeitig einen Plan B vorbereiten. Helfen auch transformative Maßnahmen nicht mehr weiter, ist gegebenenfalls ein geordneter rechtzeitiger Rückzug die letzte Gestaltungsoption. Dort, wo Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden, reduzieren sich Handlungsmöglichkeiten akut auf ein reaktives Krisen- und Katastrophenmanagement, das den Rückzug

begleitet. Welche Risiken als intolerabel eingeschätzt werden und welche Anpassungspfade im Einzelnen beschränkt werden sollten, ist dabei auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

Handlungsprinzipien etablieren

Der WBGU empfiehlt ein klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement mit den folgenden Handlungsprinzipien.

- *Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur sicherstellen:* Wasser muss als globales, Leben spendendes Gemeinschaftsgut nach den Bedürfnissen aller Menschen und der Natur verteilt und gespeichert werden. Naturbasierte, technische und institutionelle Lösungen für die Sicherstellung einer resilienten Wasserversorgung bei einwandfreier Wasserqualität müssen die Multifunktionalität für Mensch und Ökosysteme berücksichtigen und diese ausbalancieren.

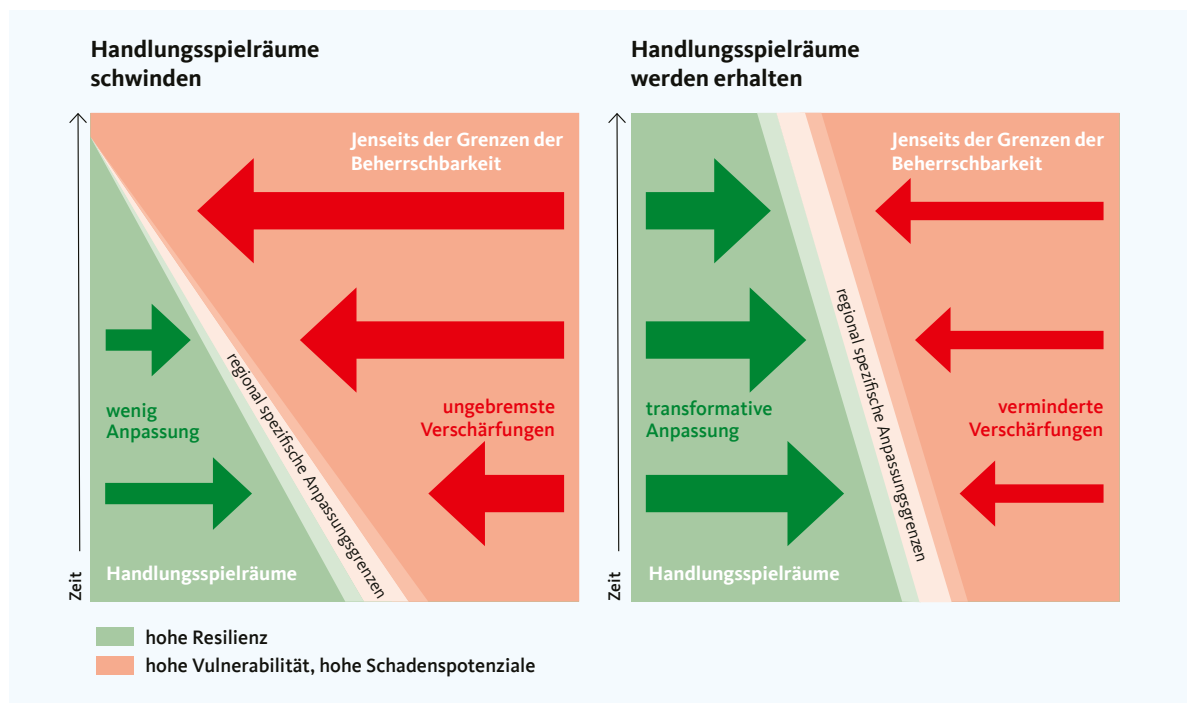


Abbildung 2

WBGU-Konzept zu Grenzen der Beherrschbarkeit. Durch ungebremste Verschärfungen bei Wasserdargebot, -verteilung und Extremereignissen sowie zu geringe Anpassung besteht die Gefahr, dass regionale Wassernotlagen entstehen und Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden. Jenseits dieser Grenzen, die sich regional unterscheiden können, sind die Risiken intolerabel hoch (roter Bereich). Welche Risiken als intolerabel eingeschätzt werden und welche Anpassungspfade im Einzelnen beschränkt werden sollten, ist dabei auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

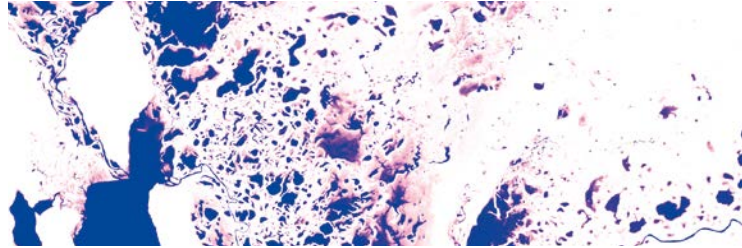
Links: Werden nur geringe Anpassungsmaßnahmen vorgenommen, schwinden Handlungsspielräume (grüner Bereich). Wasserbezogene Verschärfungen durch zunehmenden Klimawandel, Ökosystemdegradation und Verschmutzung sowie sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen können ihre ganze Wucht entfalten. Vulnerabilität und Schadenspotenziale nehmen zu, im Zeitverlauf steigt die Gefahr, Grenzen der Beherrschbarkeit zu überschreiten.

Rechts: Transformative Vorsorge steigert die Resilienz und vermindert die Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen, gleichzeitig werden die Verschärfungen selbst in Grenzen gehalten. Handlungsspielräume (grüner Bereich) werden auch längerfristig erhalten.

Quelle: WBGU

- *Anpassungsfähigkeit angesichts fortlaufender Veränderungen steigern:* Systeme zur Bereitstellung und Nutzung von Wasser sollten angesichts bisher unbekannter Schwankungen und nicht genau prognostizierbarer, fortlaufender Veränderungen resilient erhalten und wissenschaftsbasiert neu aufeinander abgestimmt werden. Verwaltungen, Betreiber und Nutzer müssen sich auf eine hohe Dynamik einstellen. Dafür müssen Strukturen sowie Planungs- und Entscheidungsprozesse akteursübergreifend, anpassungsfähig und korrigierbar gestaltet sein.
- *Resilienz und Risikovorsorge statt Gefahrenabwehr:* Für die Sicherung einer klimaresilienten Wasserinfrastruktur und Wasserqualität muss das Vorsorgeprinzip konsequent angewendet werden. Risikovorsorge und Risikominimierung statt Gefahrenabwehr sollten Grundlage von Planungsprozessen und Entscheidungen im gesamten Wassersektor und davon beeinflussten Sektoren sein.
- *Blaues und grünes Wasser sektorübergreifend bewirtschaften:* Blaues und grünes Wasser müssen bei regionalen und lokalen Lösungsansätzen gemeinsam und sektorübergreifend berücksichtigt und bewirtschaftet werden. Beide besitzen strategische, geopolitische Relevanz: Neben Flusseinzugsgebieten müssen auch grenzüberschreitende Verdunstungs- und Niederschlagsmuster berücksichtigt werden. Kohärenz zwischen Politikebenen und -feldern ist hierfür Voraussetzung.
- *Wissenschaftsbasierten Diskurs über Probleme und Handlungsoptionen ermöglichen:* Der WBGU empfiehlt, einen wissenschaftsbasierten Diskurs über Strategieentwicklung und Handlungsoptionen bei Unsicherheiten zu initiieren und Bedenken von Bürger:innen und Stakeholdern zu berücksichtigen. Dazu müssen Ausmaß und Dynamiken von Verschärfungen wasserbezogener Probleme und daraus resultierende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, verstanden und Handlungsoptionen erforscht werden. Wissenschaft sollte die Politik kontinuierlich informieren und eine beratende Rolle einnehmen, z. B. durch ein wissenschaftliches Monitoring eingesetzter Instrumente. Politische und gesellschaftliche Teilhabe, Bildung und Kooperation sollten gefördert werden.
- *Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen:* Die Politik, öffentliche Institutionen, Unternehmen und Finanzmärkte sollten den Wert von Wasser und den systemischen Charakter von Wasserrisiken in ihren Entscheidungen erfassen und integrieren. Wirtschaftliche Entscheidungen müssen mit den langfristigen Zielen eines nachhaltigen Wassermanagements kompatibel sein.
- *Umsetzung beschleunigen – Selbstorganisation fördern und fördern:* Der regulatorische Rahmen und

alle Instrumente des Wassermanagements müssen eine beschleunigte Umsetzung ermöglichen und informelle, dezentrale Governancestrukturen einbinden, wo dies sinnvoll ist. Insbesondere bedarf es der Einbindung und Ertüchtigung nichtstaatlicher, selbstorganisierter Akteure.



Klimaresilientes Wassermanagement

Übernutzung von Wasserressourcen, ungleiche Verteilung, Verlust von Ökosystemleistungen sowie wasserbedingte Gesundheitsrisiken sind vielerorts durch ein fehlgeleitetes und ineffektives Wassermanagement mitverursacht. Managementansätze, die auf eine Überwindung von Missständen und Fehlstellen abzielen, wie der etablierte Integrated-Water-Resources-Management-Ansatz (IWRM), werden den Anforderungen durch den Klimawandel bisher nicht hinreichend gerecht. Die im folgenden skizzierten Grundzüge eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements, das auf den oben ausgeführten Handlungsprinzipien basiert, sollen Impulse für die Weiterentwicklung bestehender Managementansätze (IWRM, Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus, adaptives Wassermanagement) und für die stärkere Umsetzung transformativer Anpassung im Wassersektor setzen.

Wassermanagement anpassungsfähig und resilient gestalten

Der WBGU empfiehlt, eine neue Herangehensweise im Wassermanagement zu etablieren, die darauf abzielt, mit Unsicherheit zu leben, aber auch, Unsicherheit zu mindern. Ein flächendeckend etabliertes klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement sollte lokale, regionale und globale Wasserkreisläufe vorausschauend bewirtschaften und die verschiedenen Funktionen von Wasser für Menschen und Ökosysteme langfristig erhalten. Um ein Handeln unter Unsicherheit zu ermöglichen, bedarf es transdisziplinärer und kollaborativer Lern- und Entscheidungsprozesse über Sektoren und räumliche Skalen hinweg. Grundlage sind empirische Daten, Echtzeitinformationen und Zukunftsprojektionen unter verschiedenen Klimaszenarien zu Wasserdargeboten und -bedarfen, wobei auch zunehmender Wasserbedarf im

Zuge der Energiewende berücksichtigt werden muss. Dies erfordert eine Digitalisierungsoffensive. Bewirtschaftungsmethoden müssen auf dieser Grundlage konstant überwacht und gegebenenfalls kurzfristig angepasst werden. Dafür müssen Planungs- und Entscheidungsprozesse im Wassermanagement korrigierbar und Infrastrukturmaßnahmen dezentraler und adaptiver gestaltet werden.

Das Wassermanagement sollte zudem auf die Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts ausgerichtet sein. Da entsprechende Maßnahmen teilweise erst zeitverzögert wirken, ist es erforderlich, sie mit kurzfristig wirksamen Maßnahmen zu kombinieren, ohne unerwünschte Pfadabhängigkeiten zu erzeugen. In Anlehnung an den vom WBGU vorgeschlagenen integrierten Landschaftsansatz (WBGU, 2020) sollte ein integrierter Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz verfolgt werden, der den Schutz von Klima und Biodiversität, den Flächenbedarf zur Ernährungssicherung und die Stärkung natürlicher Puffer im Wasserhaushalt auf Flächen aller Nutzungsarten zusammendenkt. Das in Böden gespeicherte grüne Wasser muss unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels stärker in das Wassermanagement einbezogen werden.

Klimaanpassung, Wassermanagement und Ökosystemschutz sollten besser verzahnt werden. Um eine stärkere Nutzung regulierender Ökosystemleistungen zur Stabilisierung des Wasserdargebots zu ermöglichen, sollte die Sicherstellung der Funktionen von Wasser für Ökosysteme eine zentrale Rolle im Wassermanagement spielen.

Um die lokale Trinkwasserversorgung resilienter aufzustellen, ist die Nutzung verschiedener unabhängiger blauer Wasserressourcen erforderlich, die redundant sind und sich gegenseitig ergänzen. Wo erforderlich und

technisch möglich, empfiehlt sich auch die stärkere Nutzung alternativer Wasserressourcen wie entsalztes Meerwasser oder kommunale Kläranlagenabläufe, sofern nachteilige Konsequenzen, etwa für Ökosysteme und menschliche Gesundheit, vermieden werden können. Mehrfachnutzungen von Wasser verschiedener Qualitätsstufen sollten beim Bau von Wasserinfrastruktur und Gebäuden antizipiert werden. Flächendeckend sollten digitale Wasserinformationssysteme etabliert werden, die Entnahmen von Privathaushalten, öffentlichen Einrichtungen und der Industrie erfassen, damit die Bereitstellung durch den Versorger angepasst werden kann. Dabei sollte künftig auch künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen, hierzu besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Bei Großverbrauchern können dezentrale Wasserspeicher und Wasserwiederverwendung etabliert werden, die zu einer flexibleren Wasserentnahme beitragen.

Um kurzfristig mit zunehmenden Extremereignissen umzugehen, sollte – kombiniert mit langfristig wirksamen Maßnahmen zur Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts – ein breites Spektrum adaptiver, schnell wirksamer und ressourceneffizienter Maßnahmen zum Einsatz kommen, von rein technischen bis hin zu stärker naturbasierten Maßnahmen. Die Auswahl und Kombination der Maßnahmen sollten sich an den in Kasten 3 dargestellten Anforderungen orientieren.

Zudem sollten Ansätze für Abwägungsprozesse unter Unsicherheit weiterentwickelt und in die Anwendung gebracht werden. In besonders durch Wassernotlagen gefährdeten Gebieten sollten transdisziplinäre Foren geschaffen werden, um die anstehenden Herausforderungen zu thematisieren und kollaborativ Anpassungsoptionen zu entwickeln. Um agile Anpassung von Politik

Kasten 3

Anforderungen an Maßnahmen eines klimaresilienten Wassermanagements

Der WBGU schlägt vier Anforderungen vor, die bei der Auswahl, Umsetzung und Entwicklung von Maßnahmen eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements zu beachten sind:

Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen: Die Wirksamkeit von Maßnahmen sollte zum einen im Hinblick auf spezifische wasserbezogene Ziele und zum anderen in jedem Fall bezüglich ihres Beitrags für die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts beurteilt werden. Vor dem Hintergrund der wasserbezogenen Verschärfungen müssen verschiedene Zeithorizonte, Unsicherheiten und Wirkungsverzögerungen sowie Anpassungsgrenzen beachtet werden.

Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext: Die Machbarkeit von Maßnahmen sollte kontextspezifisch unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Technologien, finanziellen Mitteln, institutionellen Kapazitäten, ihrer Akzeptanz sowie ihres Flächen- und Ressourcenbedarfs beurteilt werden – auch im Hinblick auf ihren langfristigen Betrieb und ihre möglicherweise im Zeitverlauf nötige Anpassung.

Stärkerer Fokus auf mögliche Mehrgewinne: Mögliche Mehrgewinne für Klima- und Biodiversitätsschutz sowie Gesundheit, soziale und wirtschaftliche Vorteile von Maßnahmen sowie Effekte auf die Verringerung von Ungleichheiten sollten antizipiert, evaluiert und bei der Beurteilung von Maßnahmen berücksichtigt werden.

Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen: Um Fehlanpassung und weitere nicht intendierte wasserbezogene, ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Konsequenzen zu vermeiden, sollten möglichst alle Auswirkungen von Maßnahmen durch einen systemischen und transdisziplinären Ansatz identifiziert, evaluiert und berücksichtigt werden.

zu fördern, sollten mehr Forschungsvorhaben finanziert werden, die zeitnahe technische Anpassungsmaßnahmen und Politikmaßnahmen sowie deren (Wasser-)Wirksamkeit überprüfen. Technische Anpassungsmaßnahmen, z. B. Planungsgrundlagen für Infrastrukturmaßnahmen wie das Auftreten eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ₁₀₀), müssen angepasst werden.

Lösungsraum Ökosysteme

Für ein klimaresilientes Wassermanagement spielt die Renaturierung von Feuchtgebieten wie Sümpfen und Marschen, Fluss- und Auenlandschaften oder Mooren sowie weiterer wasserrelevanter Ökosysteme wie Wälder eine wichtige Rolle. Seit der vorindustriellen Ära sind schätzungsweise mehr als 80 % der weltweiten Feuchtgebiete durch Landnutzungsänderungen und Entwässerung verloren gegangen und die verbleibenden Feuchtgebiete sind größtenteils degradiert (UNEP, 2021a). Renaturierungsmaßnahmen in Feuchtgebieten können den Rückhalt von Wasser in der Landschaft verbessern und damit die lokale Wasserverfügbarkeit für Mensch und Natur erhöhen, die Trinkwasserversorgung stabilisieren, zum Hochwasserschutz beitragen sowie Wasserqualität und Nährstoffspeicherung verbessern. Mehrgewinne umfassen z. B. die Bereitstellung von Lebensraum für eine diverse Flora und Fauna, die Verbesserung der Bodenqualität sowie Beiträge zum Lebensunterhalt und der Kultur lokaler Gemeinschaften. Die Wiedervernässung von Mooren ist außerdem für den Klimaschutz von großer Bedeutung. Ob die Renaturierung eines Feuchtgebiets machbar ist, hängt auch von der regionalen Verfügbarkeit von Wasser mit entsprechender Wasserqualität ab. Unbeabsichtigte Konsequenzen wie die Verbreitung invasiver Arten oder eine Veränderung des lokalen Wasserkreislaufs, die z. B. die Landwirtschaft beeinträchtigt, sollten einkalkuliert und vermieden werden.

Der WBGU empfiehlt, die Renaturierung von Ökosystemen mit großer Bedeutung für den Wasserhaushalt auf allen politischen Ebenen voranzutreiben. Dies umfasst explizit wasserbezogene Aktivitäten innerhalb der UN-Dekade für die Wiederherstellung von Ökosystemen, der UN-Wasserdekade, der Agenda 2030 für Nachhaltigkeit, der Ramsar-Konvention, der EU-Wasserrahmenrichtlinie, der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur sowie der relevanten nationalen Strategien. Außerdem sollte das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz sowie verwandte relevante Strategien wie die Nationale Moorschutzstrategie langfristig gefördert und enthaltene Maßnahmen auch im Interesse eines klimaresilienten Wassermanagements zeitnah umgesetzt werden.

Im Sinne eines integrierten Landschaftsansatzes (WBGU, 2020) ist es empfehlenswert, frühzeitig mit Landnutzer:innen, Anrainern zu renaturierender Flächen

und weiteren Stakeholdern in Dialog zu treten. Dadurch können Konflikte vermieden, Mehrgewinne gesteigert und die gesellschaftliche Akzeptanz für die Renaturierung erhöht werden. Die Umsetzung der Maßnahmen sollte mit Blick auf die Multifunktionalität des gesamten Ökosystems (z. B. einer Fluss- und Auenlandschaft) erfolgen und den Mosaikansatz in der Raumplanung berücksichtigen (WBGU, 2024). So können vielfältige Fluss- und Auenlandschaften mit hoher Biodiversität entstehen, die diverse Funktionen wie Stabilisierung der Wasserpegel, Wasseraufbereitung, Grundwasserbildung und -regenerierung, CO₂-Bindung, Bereitstellung von Lebensräumen oder Erholung erfüllen. Entlang des gesamten Flusssystems kann eine nachhaltige Nutzung u. a. für Schifffahrt, Fischerei, Tourismus und Trinkwasserversorgung ermöglicht und ein naturnahes, harmonisches Erscheinungsbild wiederhergestellt werden.

Der Rückbau von Barrieren in Flussläufen sollte vorangetrieben werden, um die Konnektivität von Flussläufen wiederherzustellen und weitreichende ökologische und wasserbezogene Mehrgewinne zu ermöglichen. Es wird empfohlen, bei Renaturierungsmaßnahmen und Raumplanung die Möglichkeit der Entstehung neuer Ökosysteme einzubeziehen. Dies sollte zu einer Reflexion des gesetzlich geregelten „guten ökologischen Zustands“ (EU-Wasserrahmenrichtlinie) führen. Unter Umständen kann dies sogar eine Ergänzung unter Berücksichtigung von Renaturierung zur Steigerung der Resilienz von Ökosystemen bedeuten. Adaptives Management, das regelmäßiges Monitoring mit Hilfe wissenschaftlich erprobter Methoden und robuster Modellierungen mit einbezieht, kann helfen, die Prozesse der Renaturierung eines Ökosystems zu antizipieren und bei Bedarf rechtzeitig Folgemaßnahmen zu ergreifen.

In der Forschung sollten die Perspektive der Wasserversorgung sowie der Schutz und die Wiederherstellung von Ökosystemen, insbesondere Süßwasserökosysteme, integriert bzw. stärker berücksichtigt werden, etwa in der Forschungsstrategie Zukunft und Innovation. Die Forschung zu Sumpf- und Flusslandschaften sollte ausgebaut werden: Um unterschiedlichen Nutzungsansprüchen an Flussläufe und -landschaften gerecht zu werden, braucht es verstärkt auch Forschung, die ihre vielfältigen Ökosystemleistungen abhängig von Renaturierungsmaßnahmen analysiert. Die Erkenntnisse sollten in eine multifunktionale Raumplanung einfließen.

Langzeitstudien, Forschungs- und Monitoringprojekte nehmen einen wichtigen Stellenwert ein und sollten gefördert werden: Beispiele sind Studien zu den vielfältigen Auswirkungen des Rückbaus von Dämmen sowie zum Vergleich zwischen dem Ausgangszustand, dem ökologischen Zustand nach Dammbau und nach Entfernung, oder zum Wassereintrag in Hochmooren. Forschungsbedarf besteht bei der Typisierung und Kartierung

von Mooren, um Moore und ihren Beitrag zum Klimaschutz und zur Erhaltung spezifischer Biodiversität effektiv überwachen, schützen und renaturieren zu können. Auch sozial-ökologische Forschung sollte gestärkt werden: Zum Beispiel sollten die Leistungen von Ökosystemen sowie die Einflüsse von Management und Renaturierung umfassend untersucht und Methoden zur wirksamen Umsetzung des Integrierten Landschaftsansatzes für Ökosysteme mit großer Bedeutung für den Wasserhaushalt erforscht und bereitgestellt werden.

Lösungsraum Landwirtschaft

Klimaresilientes Wassermanagement in der Landwirtschaft bedeutet zum einen, Anbaukulturen und -methoden anzupassen (und gegebenenfalls zu bewässern), um mit Schwankungen des Wasserdargebots und dem Klimawandel insgesamt umzugehen. Zum anderen beeinflussen landwirtschaftliche Praktiken ihrerseits auch den Wasserhaushalt bzw. das Wasserdargebot; die Landwirtschaft muss also zu einem klimaresilienten Landschaftswasserhaushalt beitragen. Ansätze zur Reduktion wasserbezogener Risiken sind vielfältig und lokalspezifisch, ihre Wirksamkeit nimmt mit zunehmendem Klimawandel ab und ist mit Unsicherheiten behaftet. Unter den in Betracht kommenden Ansätzen sind Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte sowie Agroforstwirtschaft auch noch bei stärkerer Erwärmung relativ wirksam. Oft werden einzelne Maßnahmen aber nicht mehr ausreichen, sondern Kombinationen nötig sein (Caretta et al., 2022). Der WBGU hat in seinem Gutachten „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“ umfangreiche Empfehlungen für eine ökologisch-nachhaltige Landwirtschaft und deren Einbettung in einen integrierten Landschaftsansatz gegeben (WBGU, 2020). Darüber hinaus werden die folgenden Empfehlungen zum klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagement in der Landwirtschaft präsentiert:

Erstens sollten Daten und Projektionen zu Wassernutzung und -dargebot verbessert sowie mehr Wissen zu wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bereitgestellt werden. Viele Maßnahmen liegen im Eigeninteresse und grundsätzlich auch im Einflussbereich des einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs. Beratungs- und Schulungsangebote oder regionale Unterstützungsteams sollten Landwirt:innen daher Wissen und Fähigkeiten für ein klimaresilientes Wassermanagement vermitteln und sie in dessen praxistaugliche Weiterentwicklung einbeziehen. Für die übergreifende Planung und Regulierung sollten Entnahme- und Verbrauchsdaten möglichst in Echtzeit erhoben, Daten zum Wasserdargebot, Grundwasserkörpern usw. verbessert und gemeinsam mit entsprechenden Projektionen zur Verfügung gestellt werden. Dies sollte Teil einer breiteren Digitalisierungsoffensive für die Landwirtschaft sein. Es

sollten Kapazitäten für die Verbesserung öffentlich verfügbarer, lokaler Projektionen und wissenschaftliche Begleitung von Anpassungsmaßnahmen aufgebaut werden. Erfahrungen sollten in internationalen Netzwerken ausgetauscht werden, auch mit Ländern niedrigen Einkommens. In diesen Ländern, etwa in Subsahara-Afrika, sollte das Potenzial lokaler Wissenssysteme in lokalen Anpassungs- und Transformationsstrategien der Landwirtschaft noch besser genutzt werden. Entsprechende Beratungsangebote und Vernetzungsaktivitäten könnten international z. B. durch die GIZ und in Deutschland durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung weiter ausgebaut werden.

Zweitens sollte Landwirtschaft auch als „Grünwasserwirtschaft“ wertgeschätzt und in integrierte Landschafts- und Wassermanagementansätze eingebunden werden: Von Anpassungsmaßnahmen, die den Wasserhaushalt und die Wasserqualität beeinflussen – z. B. durch Schaffung von Puffern, höhere Grundwasserneubildung oder Erhaltung von Ökosystemleistungen – profitieren auch andere Wassernutzer oder die Allgemeinheit. Landnutzer sollten daher stärker als Wasserakteure verstanden und Landwirt:innen in ihrer Rolle als „Grünwasserwirt:innen“ stärker unterstützt werden. Dies sollte sich im politischen und gesellschaftlichen Umgang mit der Landwirtschaft, ihrer Wertschätzung, in der Aus- und Fortbildung sowie in ihrer Einbindung in Wassermanagementprozesse – etwa einem integrierten Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz und Klimaanpassungsstrategien – und in finanziellen Anreizen widerspiegeln.

Drittens sind finanzielle Anreize für Landwirt:innen und eine Absicherung von Transformationsanstrengungen erforderlich; in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens muss z. T. überhaupt erst ausreichender Zugang zu Ressourcen und Kapital geschaffen werden. Es sollten Ausgleichsmechanismen zwischen Landnutzern und Wassernutzern für wasserwirksame Maßnahmen etabliert werden, etwa Wasserfonds. Wasserbezogene landwirtschaftliche Subventionen können in diese Mechanismen eingebunden werden. In der EU betrifft dies den nächsten Zyklus der gemeinsamen Agrarpolitik, die zu einer „gemeinsamen Ökosystempolitik“ umgestaltet werden sollte (WBGU, 2020). Da bei Wasserrisiken die Kooperation zwischen Landwirt:innen und öffentlicher Hand unabdingbar ist, könnten hier neue Verhandlungsspielräume entstehen. Flankierend sollten existenzsichernde Angebote für den Übergang geschaffen werden, die die Risiken der Transformation für die Landwirtschaft mindern, z. B. durch temporäre Einkommensunterstützungen oder eine teilweise Absicherung möglicher Mindererträge bei der Erprobung neuer Anbaumethoden. Eine mögliche Regulierung oder Besteuerung tatsächlicher Wasserentnahmen und -verbräuche (auf Basis verbesserter Daten) sollte durch die

genannten unterstützenden Maßnahmen auch mit Blick auf die soziale Ausgewogenheit unterstützt werden.

Die Forschung sollte neue Leitbilder für die Landwirtschaft entwickeln. Lernen aus der praktischen Erfahrung mit Anpassungsstrategien steht im Vordergrund. Auch Werkzeuge und Metriken zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen sollten weiterentwickelt werden. Optionen wie Verhaltensänderungen oder kapazitätsbildende Maßnahmen können in aktuellen Klima- und Wirkungsmodellen bisher oft nicht erfasst werden. Geeignet skalierte Modelle sind nötig, die ökonomische, soziale, kulturelle und Managementaspekte für verschiedene Anpassungsoptionen berücksichtigen sowie Mehrgewinne und Zielkonflikte für nachhaltige Entwicklung einbeziehen. Bei der potenziellen Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion wasserbezogener Risiken bestehen vor allem für Klimaszenarien mit Erwärmungen von 2 °C und mehr noch Wissenslücken. Speziell die Potenziale und Grenzen von Bewässerung als Anpassungsoption sollten besser erforscht werden, da globale Modellierungen die lokale Verfügbarkeit von Wasser häufig nicht hinreichend berücksichtigen. Auch um Wechselbeziehungen im Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus besser zu verstehen und veränderte sektorale Ansprüche im Klimawandel zu projizieren, müssen Werkzeuge entwickelt werden.

Lösungsraum Städte

Bis zum Jahr 2050 wird die globale Stadtbevölkerung auf schätzungsweise 6,6 Mrd. Menschen anwachsen, zwei Drittel der Menschheit werden dann in Städten leben (UN, 2019). Zugleich sind die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Städten weltweit immer deutlicher zu spüren. Neben steigendem Nutzungsdruck führen häufigere und längere Dürreperioden zu zunehmender Wasserknappheit, und weltweit steigt die Zahl der Städte, in denen bereits ein Wassernotstand ausgerufen werden musste. Häufigere und stärkere Extremniederschläge verursachen, verstärkt durch urbane Flächenversiegelung und überforderte Abwassersysteme, immer mehr Flut Schäden. Zunehmender Hitzestress, der durch den urbanen Hitzeinseleffekt noch verstärkt wird, führt zu einer steigenden Zahl hitzebedingter Todesfälle.

Der WBGU empfiehlt, ein klimaresilientes urbanes Wassermanagement gemäß des Leitbilds der wasser-sensiblen Stadtentwicklung flächendeckend zu etablieren. Es ist, gemeinsam mit dem Zugang zu erschwinglichem, klimaangepasstem Wohnraum, zentral für eine nachhaltige und gerechte Stadtgestaltung der Zukunft. Dabei muss die städtische Infrastruktur so gestaltet werden, dass sie den Auswirkungen von Extremereignissen resilienter begegnen kann und den lokalen Wasserkreislauf darin stärkt, zunehmende Wasserextreme effizient abzuf puffern. Städtische Infrastruktur sollte sich in den

natürlichen Landschaftswasserhaushalt einfügen. Es ist essenziell, hierbei mittel- und langfristige Klimaprojektionen zu berücksichtigen. Synergien zwischen wasser-sensibler Stadtentwicklung und der Abfederung des städtischen Wärmeinseleffekts sollten gezielt angestrebt werden. Zudem sollten stets die Gewährleistung urbaner Lebensqualität und der Abbau sozialer Ungleichheiten als wesentliche Beiträge zu einer verbesserten urbanen Klimaresilienz mitgedacht und antizipiert werden.

Angesichts der vielerorts zunehmenden Verschärfungen im Wassersektor ist in Städten weltweit eine Beschleunigung der Anpassung an den Klimawandel dringend notwendig. Neben der Etablierung eines klimaresilienten Wassermanagements gehört hierzu insbesondere der Auf- und Ausbau klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur. Er muss insbesondere in schnell wachsenden Städten deutlich beschleunigt werden, um mit dem raschen, oftmals informellen Wachstum (vor allem in Afrika und Asien) Schritt zu halten. Dabei sollten informelle Stadtquartiere besondere Berücksichtigung finden, wobei z. B. auf dezentrale und nicht leitungs-gebundene Abwassersysteme zurückgegriffen werden kann. Bei deren Planung und Umsetzung sollte die lokale Bevölkerung einbezogen, über gesundheitliche Vorteile informiert und Kapazitäten vormals informeller Dienst-leister gestärkt werden. Die Finanzierung des Auf- und Ausbaus klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sollte verstärkt in der bi- und multilateralen Entwicklungs-zusammenarbeit vorangetrieben werden.

Um Fehlanpassung und eine Verstärkung von Vulnerabilität und bestehenden Ungleichheiten zu verhindern, ist beim Auf- und Ausbau blau-grüner Infrastruktur in Städten darauf zu achten, negative soziale, gesundheitliche und ökologische Konsequenzen zu vermeiden. Verdrängungseffekten sollte vorgebeugt werden. Die Vegetation sollte für zu erwartende Klimaänderungen geeignet sein und ein geringes allergenes Potenzial aufweisen. Urbane Grünräume sollten gut erreichbar, zugänglich und auf die Bedürfnisse der lokalen Bevölkerung zugeschnitten sein.

Der WBGU empfiehlt weiterhin, Notfallpläne für urbanen Wassermangel zu entwickeln. Die Zahl der Städte, die aufgrund von Wassermangel den Notstand ausgerufen haben, steigt weltweit an. Dieses wachsende globale Problem hat ungelöst ein erhebliches Destabilisierungspotenzial und verdient daher in der internationalen Nachhaltigkeitspolitik höhere Aufmerksamkeit.

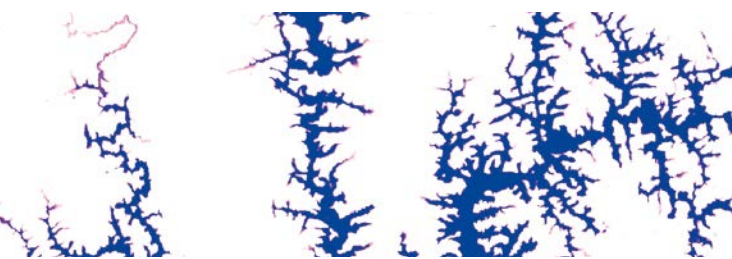
Darüber hinaus gilt es, wasserbedingte Grenzen des Städtewachstums in den Blick zu nehmen. Der Klimawandel wird viele Städte mit existenziellen Herausforderungen im Zusammenhang mit Wasser konfrontieren, die heute vielfach noch kaum thematisiert werden. Insbesondere Städte, die mittel- und langfristig das Problem

der Wasserknappheit allein mit Infrastrukturmaßnahmen nicht wirksam werden lösen können, sollten nach Ausschöpfung aller Mittel rechtzeitig Optionen zur Begrenzung des Städtewachstums bzw. im Extremfall Optionen für einen geordneten Rückzug prüfen.

Im Zeitalter der Urbanisierung sehen sich immer mehr städtische Kommunen mit saisonaler oder dauerhafter Wasserknappheit konfrontiert. Zur effektiven Umsetzung bekannter Anpassungsmaßnahmen, aber auch zum Umgang mit den genannten hydrologischen Grenzbedingungen besteht Forschungsbedarf.

Bei existierender urbaner Infrastruktur sind innovative Ansätze für die Integration resilienzsteigernder Lösungen im Bestand erforderlich, um transformative Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. Dabei stellt sich die Frage, wie neue Wasserbereitstellungskonzepte möglichst wenig invasiv und kostengünstig im Bestand realisiert werden können.

Gerade in Regionen mit angespanntem Wasserangebot ist eine bessere zeitliche und räumliche Erfassung privater und gewerblicher Bedarfe notwendig, idealerweise in Echtzeit. Forschungsbedarf besteht zur Erfassungsdichte von Verbrauchsstellen, ethischer Aspekte der Datenerhebung, Datenverarbeitung, Datensicherheit und Bereitstellung sowie Möglichkeiten des Einsatzes künstlicher Intelligenz.



Schutz der Wasserqualität

Die Qualität von Wasserressourcen ist durch die Freisetzung von Schadstoffen und Pathogenen weltweit stark beeinträchtigt. Die Nutzung von Wasser als Transportmedium führt in vielen Fällen zu erheblichen Aufkonzentrierungen von Schadstoffen im Wasser. Dies überfordert regelmäßig die Selbstreinigungskraft der Natur. Der Schutz der Wasserqualität ist daher unabdingbar, um der Verknappung der Wasserressourcen durch die beschriebenen Verschärfungen entgegen zu wirken. Im Europäischen Green Deal ist bereits das Ziel „Zero Pollution“ bis zum Jahr 2050 verankert (Europäische Kommission, 2021b). Zero Pollution bedeutet, dass die Verschmutzung auf ein Niveau gesenkt wird, welches für die menschliche Gesundheit und die Gesundheit von Ökosystemen nicht mehr schädlich ist. Das Leitbild Zero

Pollution ist von hoher Bedeutung und erfordert die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft.

Zentrale Bausteine zur Umsetzung beider Leitbilder sind (1) eine zügige Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie, (2) moderne Testverfahren und Methoden zur Stoffbewertung, die persistente und (wasser-) mobile Schadstoffe besser erfassen können und präventiv stärker in behördlichen Zulassungsverfahren zu berücksichtigen sind, (3) integrierte Ansätze zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwässern sowie (4) der flexible Einsatz zentraler und dezentraler Abwasserentsorgungssysteme beim Ausbau sanitärer Infrastruktur in Ländern mit mittleren und niedrigen Einkommen.

Herstellerverantwortung in der EU ausweiten

Die EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist eine bedeutende Richtungsentscheidung zur Bewahrung der Wasserqualität und sollte nach Erlass zügig in den EU-Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Der WBGU begrüßt insbesondere die integrierte erweiterte Herstellerverantwortung, wonach Produzenten von Arzneimitteln und Kosmetika mindestens 80 % der Kosten von Bau und Betrieb der zur Entfernung organischer Spurenstoffe notwendigen vierten Reinigungsstufe in Klärwerken tragen sollen. Es sollte geprüft werden, inwieweit eine Ausweitung der erweiterten Herstellerverantwortung für weitere Schadstoffgruppen (z. B. toxische und persistente Haushaltschemikalien und Pestizide) und Stoffeigenschaften (neben Toxizität auch Persistenz in der aquatischen Umwelt) möglich ist. Bei der Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist entscheidend, Anreize zur Reduktion der Emission umweltgefährdender Stoffe zu setzen, z. B. durch eine Staffelung der Beteiligung von Unternehmen nach Umweltgefährdung der in Verkehr gebrachten bzw. produzierten Stoffe oder Ausnahmen für rasch abbaubare Produkte.

Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser ausweiten

Abwasser ist eine wertvolle Ressource und sollte in dreierlei Hinsicht zur Schließung von Lücken in der Kreislaufwirtschaft genutzt werden. Abwasser sollte erstens neben der Rückführung in die Gewässer je nach Bedarf und entsprechend seiner Qualität z. B. zur Bewässerung in der Landwirtschaft aufbereitet und wiederverwendet werden. Zweitens sollten Potenziale zur Rückgewinnung von Energie aus den Prozessen der Abwasserbehandlung stärker genutzt werden. Dies kann auch helfen, die in der EU-Kommunalabwasserrichtlinie angestrebte Energieutralität kommunaler Kläranlagen zu erreichen. Abwasser ist drittens ein Träger für Stoffe, die teilweise als schädlich gelten, aber als wertvolle Sekundärrohstoffe genutzt werden können, z. B. Biopolymere und Metallionen wie Lithium und Kupfer. Vorbild für den Umgang

mit ihnen könnte die in der deutschen Klärschlammverordnung festgeschriebene Rückgewinnung von Phosphor sein. Bei erfolgreicher Wiedergewinnung könnten der Bedarf an Primärabbau sowie die damit verbundenen negativen Umweltfolgen möglicherweise sinken. Allerdings sind nicht alle Abwässer hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der technischen Machbarkeit gleichermaßen zur Rückgewinnung geeignet.

Der WBGU sieht in den Technologien zur Rohstoffrückgewinnung ein großes Potenzial. Materialrückgewinnung gewinnt an Bedeutung. Die Energiewende ist auch eine Materialwende, die sehr relevant für Wasser ist. Forschungsbedarf besteht zu den Risiken, die mit den für die Energiewende wichtigen Materialien (z. B. Lithium) verbunden sind, etwa ihr Verhalten in der Umwelt und für die Gesundheit.

Eintrag schädlicher Chemikalien vermeiden

Beeinträchtigungen der Wasserqualität durch Industriechemikalien, die sich entlang von Wasserpfeifen ausbreiten und sich nicht rückgewinnen lassen, sind vermeidbar, wenn Stoffe vor der Registrierung und Inverkehrbringung auf Gesundheits- und Umwelteigenschaften getestet werden. Innovative biologische Hochdurchsatz-Testverfahren und Simulationen bei der Stoffentwicklung mittels künstlicher Intelligenz ermöglichen der herstellenden Industrie eine deutlich schnellere und umfassendere Risikobewertung und Kennzeichnung. Neue Stoffe lassen sich so kostengünstiger und trotzdem sicherer auf den Markt bringen; bereits auf dem Markt befindliche Stoffe lassen sich nachträglich besser charakterisieren. Dies kann substantiell zur Umsetzung des Zero-Pollution-Leitbilds beitragen und präventiv Wasser, Ökosysteme und die menschliche Gesundheit schützen.

Zentrale und dezentrale Abwassersysteme flexibel einsetzen

Die unzureichende Behandlung häuslicher Abwässer ist in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen eine Hauptursache für die Verschmutzung von Grundwässern und Oberflächengewässern mit pathogenen Mikroorganismen, organischen Kohlenstoffverbindungen, Nährstoffen und Makro- und Mikroplastik. Um dieser Form der Verschmutzung zu begegnen, wurde historisch der kostenintensive Aufbau einer zentralen Abwasserbehandlung mit ausgedehnten Kanalnetzen nach Vorbild der Hocheinkommensländer favorisiert. Für viele formelle und insbesondere informelle Siedlungen in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen ist eine zentrale Abwasserbehandlung jedoch keine geeignete, standortgerechte Lösung.

Vielversprechend ist dagegen der flexible Einsatz zentraler und dezentraler Abwassersysteme wie das Konzept der Citywide Inclusive Sanitation (CWIS) mit Fokus auf

einem sozial ausgewogenen Zugang aller Bevölkerungsgruppen und aller Stadtteile zu Wasser, Sanitär und Hygiene (WASH). CWIS versteht Abwasserentsorgung und -behandlung als Servicekonzept und nicht als reine Infrastrukturversorgung; verschiedene technische Lösungen können gleichberechtigt betrachtet und flexibel eingesetzt werden. Dazu gehören die zentrale Kanalisation, aber auch dezentrale, nicht an ein Abwassernetz angeschlossene Sanitäranlagen (non-sewered sanitation) mit Fäkalschlammmanagement. Internationale Geldgeber (Weltbank, Asian Development Bank) und Branchenverbände (International Water Association) haben das CWIS-Konzept bereits aufgegriffen. Der WBGU empfiehlt die Förderung der Bereitstellung von Zugang zu sicherem Wasser und Hygiene anhand des CWIS-Konzepts statt einer Fokussierung auf ausschließlich zentrale Abwasserbehandlungskonzepte. Dies erfordert ein Umdenken bei Entscheidungsträgern, Geldgebern, Planungsbüros und Universitäten, um hygienische, dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme als echte Alternative zu zentralen Abwassersystemen zu sehen. Voraussetzung ist auch die Verbesserung und Formalisierung informeller, bestehender (unsicherer, unhygienischer) dezentraler, nicht leitungsgebundener Abwassersysteme, die Priorisierung von WASH in politischen Agenden sowie Übernahme von Leadership durch nationale Regierungen. Im Rahmen von Forschung müssen Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme entwickelt sowie deren technische Weiterentwicklung vorangetrieben werden.



Entwicklung einer klimaresilienten Wassergovernance

Um Schäden an Menschen und Natur zu vermeiden und Verteilungskonflikten vorzubeugen, bedarf es einer vorausschauenden, lern- und anpassungsfähigen Wassergovernance.

International Verantwortung übernehmen – Internationale Wasserstrategie entwickeln

Der WBGU empfiehlt die Entwicklung einer Internationalen Wasserstrategie als neuen Impuls für die Wasserdiplomatie (Abb. 3). Diese soll dazu beitragen, die



Abbildung 3

Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie. Die Internationale Wasserstrategie und nationale Wasserstrategien wirken mit dem lokalen Wassermanagement zusammen. Das lokale Wassermanagement umfasst neben Kommunen alle relevanten Akteure, inklusive selbstorganisierter Strukturen. Nationale Wasserstrategien sollten kohärent mit der Internationalen Wasserstrategie formuliert werden. Sie sollten lokal Maßnahmen des klimaresilienten Managements anstoßen sowie Nothilfe und Krisenmanagement beinhalten.

Quelle: WBGU

bisherigen Prozesse zu Wasser institutionell als Austausch- und Koordinierungsplattform zu verstetigen. Da zahlreiche Schnittstellen zu anderen Politikbereichen bestehen, z. B. zur Klima- und Biodiversitätsgovernance und nachhaltigen Landnutzung sowie zu regionalen (z. B. der EU) und nationalen Wasserstrategien, sollten die Kapazitäten an den Schnittstellen erhöht werden. Dadurch können Akteure, die bereits jetzt an den relevanten Schnittstellen arbeiten und über wasserspezifische Netzwerke und Erfahrungswissen verfügen, zukünftig eine aktive Rolle in der Aushandlung und Entwicklung einer Internationalen Wasserstrategie einnehmen.

Die Internationale Wasserstrategie sollte den Schutz der Ressource Wasser als gemeinsames Anliegen der Menschheit (common concern of humankind) anerkennen und dabei auch den Umgang mit grünem Wasser und dessen mögliche völkerrechtliche Regulierung adressieren. Sie sollte eine bessere Verzahnung der bestehenden Wasserkonventionen mit weiteren wasserrelevanten völkerrechtlichen Verträgen anstreben. In der Gestaltung des Prozesses sollte darauf geachtet werden, zunächst die weniger kontroversen Themen zu behandeln. Diese umfassen Trinkwasser, Integration, Bildung und Forschung sowie Kooperation. Zur Steigerung der Konsensfähigkeit sollte die Strategie zunächst auf unverbindliche Instrumente setzen. Langfristig

sollte die Internationale Wasserstrategie in ein völkerrechtliches Abkommen – vergleichbar den Rio-Konventionen – münden.

Die Internationale Wasserstrategie könnte Staaten motivieren und animieren, den bestehenden völkerrechtlichen Wasserkonventionen – der UN-Gewässerkonvention und der UNECE-Wasserkonvention – beizutreten. Was diesen Wasserabkommen fehlt, ist ein Fokus neben blauem auch auf grünem Wasser. Perspektivisch sollte daher ihr Anwendungsbereich erweitert werden, um einen klimaresilienten Umgang auch mit grünem Wasser zu erreichen. Die komplexen internationalen Wirkungszusammenhänge von grünem und atmosphärischem Wasser, z. B. Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Verdunstungsströme und Niederschläge anderer Länder, müssen dringend erforscht werden. Für entsprechende wissenschaftliche Kooperation mit Blick auf eine nachfolgende angemessene Wassergovernance kann die Internationale Wasserstrategie als Plattform für regelmäßigem Austausch dienen. Eine Governance blauen und grünen Wassers könnte etwa Informations-, Konsultations- und Zustimmungspflichten bei Vorhaben und bei umfangreichen Landnutzungsänderungen umfassen, die signifikanten Einfluss auf den grenzüberschreitenden atmosphärischen Wassertransport haben.

Der WBGU befürwortet weiterhin die staatliche Anerkennung und Kodifizierung eines allgemeinen Menschenrechts auf Wasser, das nicht lediglich den Zugang zu sauberem Trinkwasser umfasst, sondern auch die Beteiligung der Zivilgesellschaft an wasserrelevanten Entscheidungsprozessen sowie den Zugang zu Umweltinformationen und Rechtsschutz. Die Anerkennung sollte zudem klarstellen, dass es sich bei dem Menschenrecht auf Wasser um eine Ausprägung des Menschenrechts auf eine gesunde Umwelt handelt, das ebenfalls noch nicht kodifiziert ist (WBGU, 2023).

Um den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Wasser in die Politik zu verbessern, spricht sich der WBGU für die Gründung und international geteilte Planung und Umsetzung einer Water Mapping Initiative aus. Sie sollte aus zwei Einheiten bestehen: einer Wissenschaftsplattform und einem Expert:innengremium. Die Wissenschaftsplattform soll bestehende wissenschaftliche Expertise zusammenführen, um drohende regionale Wassernotlagen zu identifizieren. Das Expert:innen-gremium steuert die Plattform und speist ihre Arbeitsergebnisse in politische Prozesse ein (Abb. 4).

Damit Wassernotlagen frühzeitig erkannt und eingrenzt werden bzw. Pläne zum Umgang mit ihnen entwickelt werden können, bedarf es der Zusammenführung globaler Daten und Monitoringkapazitäten. Dies umfasst die Prognosen von IPCC und IPBES, Langzeitdatenreihen, Monitoring- und Beobachtungsdaten aus nationalen

Monitoringeinrichtungen sowie die Ergebnisse aus regionalen und nationalen Forschungsvorhaben. Weiterhin müsste die Plattform Daten und Erfahrungen zu vergangenen Notlagen, Ergebnisse nationaler und überregionaler Wasserforschung sowie lokale Daten und Erfahrungen zu Notlagen integrieren. Hinzu kommen hoch aufgelöste räumliche und zeitliche Daten aus Beobachtungen und Prognosemodellen auf lokaler (Flusseinzugsgebiete), regionaler, nationaler bzw. internationaler sowie globaler Ebene. Sobald das von der UN-Umweltversammlung beschlossene, in Verhandlung befindliche Science-Policy Panel zu Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung seine Arbeit aufgenommen hat, sollen seine Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden.

Zur Aufsicht und Steuerung der Plattform soll ein Expert:innengremium eingerichtet werden. Sind drohende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, soll das Gremium Prognosen für gefährdete Regionen erstellen. Parallel könnte es den Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Politik und Stakeholdern befördern. Auf internationaler Ebene soll das Expert:innengremium die UN-Wasserkonferenzen informieren. Zudem sollte das Gremium wasserbezogene Dialogplattformen in unterschiedlichen Weltregionen und in unterschiedlichen Länderverbünden sowie Politikdialoge für die Ausgestaltung einer Internationalen Wasserstrategie sowie die UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 informieren. Lokal soll das Gremium bei drohenden

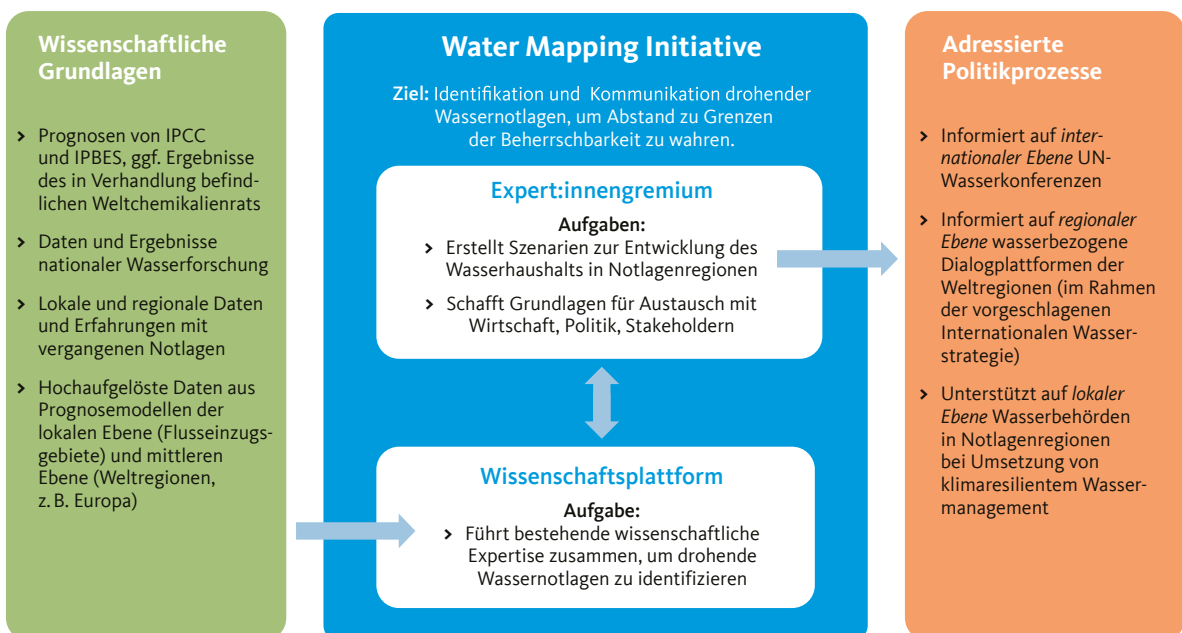


Abbildung 4

WBGU-Vorschlag für eine Water Mapping Initiative zur Vermeidung drohender regionaler Wassernotlagen. Die Wissenschaftsplattform soll drohende Wassernotlagen durch die Integration wissenschaftlicher Grundlagen möglichst frühzeitig erkennen. Das Expert:innengremium soll auf dieser Basis internationale, regionale und lokale Politikprozesse informieren und unterstützen.

Quelle: WBGU

Notlagen auch Wasserbehörden bei der Umsetzung von klimaresilientem Wassermanagement unterstützen.

Als Voraussetzung für die Arbeit der Water Mapping Initiative und für den grundsätzlichen Umgang mit wasserbezogenen Verschärfungen im Rahmen globaler Governance ist weitere Forschung erforderlich. Zentral ist, Erfahrungswissen in allen Regionen der Welt durch Daten aus Szenarien zu ergänzen, da der Klimawandel den Wasserkreislauf bereits stark verändert. Daher sollten Daten nicht nur auf lokaler, sondern auch auf Ebene der Weltregionen generiert werden. Es bedarf also dringend mehr klimasensibler Wasserforschung auf mittlerer Ebene. Die Auswirkungen und Wechselwirkungen globaler Änderungen und lokaler Maßnahmen müssen zudem für Entscheidungsprozesse als Informationsquelle zur Verfügung stehen. Nur wenn Kapazitäten für Datenerhebung und Modellierung in den Ländern mit niedrigem Einkommen vor Ort aufgebaut werden, kann klimaresiliente Planung auch umgesetzt werden.

Für die Verstärkung der UN-Wasserkonferenzen bedarf es der Einrichtung eines UN-Wassersekretariats, das zukünftig durch den Sondergesandten für Wasser (special envoy) geleitet werden könnte. Eine Internationale Wasserstrategie sollte zudem regelmäßige Treffen sowohl auf UN-Ebene als auch auf Ebene der unterschiedlichen Weltregionen beinhalten. Neue regionale Forschungsallianzen könnten diese regionalen Plattformen informieren. Hierfür werden die oben beschriebenen Szenarien auf mittlerer Ebene sehr relevant sein.

Vergleichbare Governanceansätze haben gezeigt, dass es die Motivation der Länder erhöht, sich mit globalen Risiken auseinanderzusetzen, wenn sich ihre Vertreter:innen regelmäßig auf regionaler Ebene über Ziele und Zielerreichung und bevorstehende Gefahren und Risiken in ihrer Weltregion austauschen können. Dies kann im Rahmen einer Internationalen Wasserstrategie durch die Stärkung regionaler Organisationen, wie z. B. der EU, erfolgen. Die gestärkten Regionalorganisationen könnten regionale Wassergovernanceplattformen koordinieren und so die Länder befähigen, globale und regionale Wasserziele möglichst effektiv umzusetzen. Schutzmaßnahmen auf regionaler Ebene könnten zudem durch internationale Finanzierung oder internationale Kooperation gefördert werden. In Europa könnte eine Wasserstrategie („EU Blue Deal“) auf den Europäischen Green Deal aufsetzen und auf die Europäische Biodiversitätsstrategie Bezug nehmen.

Politikkohärenz nach innen wie außen herstellen

Deutschland und die EU sollten in ihrem internationalen politischen Handeln Politikkohärenz zwischen den verschiedenen externen sowie zwischen den externen und internen Politikfeldern mit Wasserbezug herstellen. Im Rahmen ihrer internationalen Beziehungen verfolgen

sie eine Vielzahl von Zielen, die zum einen aus internationalen klima- und umweltpolitischen Vereinbarungen resultieren, zum anderen z. B. aus Wirtschaftsinteressen oder geopolitisch strategischen Interessen und Werten. Politische Maßnahmen zur Förderung dieser Ziele müssen auf Kompatibilität und Kohärenz geprüft werden. Dies kann verschiedenste Bereiche mit Wasserbezug betreffen, z. B. die Deckung der deutschen Energienachfrage, Agrarsubventionen oder Investitionsabkommen. Gerade vor dem Hintergrund geopolitischer Machtverschiebungen rückt die Bedeutung vertrauensvoller Partnerschaften und die Sicherstellung der Glaubwürdigkeit Deutschlands in seinem eigenen politischen Handeln zunehmend ins Zentrum politischer Abwägung. Auch in Vorbereitung der anstehenden Prozesse zur Neuverhandlung einer Post-2030-Agenda auf multilateraler Ebene ist die Förderung der europäischen und deutschen Glaubwürdigkeit in den Augen strategischer Partnerländer weltweit von zentraler Bedeutung.

Handels- und Wirtschaftsbeziehungen gestalten, privaten Sektor in die Verantwortung nehmen

Internationale Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik sollten nachhaltige Wassernutzung fördern und Wasserknappheit in Regionen unter Wasserstress keinesfalls verschlimmern. Dies erfordert eine bessere Integration wasserbezogener Auswirkungen und Risiken im Rahmen internationaler Handelspolitik, beispielsweise im Rahmen der World Trade Organization (WTO), von regionalen Handelsabkommen oder auch von Investitionsschutzabkommen.

Handelsbeziehungen der EU sollten gezielt auf Effekte in anderen Ländern im Wasserbereich untersucht werden (Spillover-Effekte). Fehlanreize, die negative Spillover-Effekte begünstigen, z. B. aus Regelungen in Handelsabkommen oder durch Fernwirkungen europäischer Regulierung, sollten abgebaut werden. Zudem sollten Handelsbeziehungen dazu genutzt werden, die Umstellung auf wassersparende Produktions- und Anbaumethoden bzw. alternative Einkommensquellen zu fördern.

Der WBGU empfiehlt, den Schutz von Wasserressourcen in bestehenden Handelsabkommen stärker zu verankern. Dies sollte möglichst unter WTO-Recht geschehen, um kohärente Regelungen für eine möglichst große Gruppe von Ländern zu erreichen, jedoch auch in bi- und multilateralen Abkommen, da eine Reform des WTO-Rechts kurz- und mittelfristig schwierig sein dürfte (Zengerling, 2020).

Unternehmen und Investoren sollten zudem international stärker in die Verantwortung genommen werden. Basierend auf der Berichterstattung über Wassernutzung und Wasserrisiken sollten Unternehmen und Investoren dazu angehalten werden, Maßnahmen zu

ergreifen, um negative Auswirkungen ihrer Aktivitäten auf Wasserressourcen zu vermeiden. Länder niedrigen und mittleren Einkommens sollten bei der Einführung von Berichtspflichten unterstützt werden, z. B. durch kapazitätsbildende Maßnahmen. Deutschland sollte darüber hinaus prüfen, inwieweit der Schutz von Wasserressourcen und die Erfassung von Wasserrisiken stärker in das deutsche Lieferkettengesetz integriert werden können.

Gestaltender Staat

Der Staat sollte eine aktive, gestaltende Rolle im Bereich der Wassergovernance einnehmen. Um dem Vorsorge- und Verursacherprinzip gerecht zu werden, bedarf es demokratischer Prozesse, um Strategien und Instrumenten für Wasserpolitik auszuhandeln, zu konzipieren und umzusetzen. Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Akteuren ist wichtig („mit und nicht gegen die Gesellschaft“); dies darf aber nicht bedeuten, dass sich der Staat zurückzieht und sich passiv gegenüber den Herausforderungen der Wassergovernance verhält. Der WBGU empfiehlt eine Erhöhung administrativer Kapazitäten und Ressourcen, so dass Staaten ihre Rolle und Verantwortung angemessen wahrnehmen können.

Ein zukünftiges klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement bedarf des gesteuerten und geplanten Zusammenspiels des gestaltenden Staats mit all seiner rahmengebenden Verantwortung (top down) sowie der in Teilen schon praktizierten und historisch gewachsenen Selbstorganisation (bottom up) im Wassermanagement, die nicht aus der Notwendigkeit heraus entsteht, sondern aus der Chance einer verbesserten Wassergovernance, die die Ziele eines klimaresilienten Wassermanagements beschleunigt umsetzen kann.

Selbstorganisation auf regionaler und lokaler Ebene fördern

Insbesondere in stark von wasserbezogenen Verschärfungen betroffenen Weltregionen spricht sich der WBGU für die gezielte Förderung von Strukturen aus, die (1) Selbstorganisation auf regionaler und lokaler Ebene ermöglichen (bottom-up), (2) Schwachstellen der formellen und häufig von staatlicher Hand gestalteten Wassergovernance ausgleichen sowie (3) auch Defizite informeller Systeme anerkennen und adressieren. Die Förderung von Selbstorganisation, gerade auch entlang der IWRM-Prinzipien, hat sich in der Vergangenheit bewährt, um partizipative und inklusive Formen der Entscheidungsfindung auszubauen. Gerade in Zeiten zunehmender Autokratisierungsprozesse auf politischer Ebene in der Mehrheit aller Staaten ist diese Förderung inklusiver Governanceansätze auf lokalen Ebenen und im Bereich des Wassermanagements wichtig.

Internationale Allianzen für klimaresilientes Wassermanagement

Beim Aufsetzen von Förderlinien im Bereich des Wassermanagements und der Wasserforschung sollte gezielt darauf geachtet werden, kooperative Forschungsprojekte mit Ländern zu fördern, die zunehmende Herausforderungen im Wassermanagement haben (z. B. Dürren, Überschwemmungen), die von sozialer Polarisierung und politischen Autokratisierungsprozessen betroffen sind bzw. die auf Ebene geopolitischer Aushandlungsprozesse von hoher strategischer Relevanz als Partner und Allianzen für Deutschland und Europa sind. Die empfohlene Wissenschaftskooperation sollte alle wissenschaftlichen Akteure umfassen, einschließlich Universitäten, beratende Institute und Think Tanks.

Bei der Unterstützung vertrauensbildender Maßnahmen, insbesondere in Konfliktgebieten, ist es wichtig, auf institutionelle Kapazitäten und einen auf gemeinsame Ziele fokussierten Dialog zu achten, und sich nicht vornehmlich auf technologische Lösungen und Datenverfügbarkeit zu fokussieren. Allzu oft wird Infrastrukturprojekten Vorrang eingeräumt, ohne die Bedürfnisse vor Ort für die langfristige Pflege dieser Infrastrukturen und Einbettung in formale und gesellschaftliche gelebte, informelle Steuerungssysteme mit zu bedenken. Schwieriger ist es, Normen, Denkmuster und Gewohnheiten zu ändern. Notwendig sind daher vertrauensfördernden Maßnahmen in Institutionen (über u. a. Politikkohärenz, Transparenz, Rechenschaftsablegung), langfristige Partnerschaften und ein echter Dialog mit den Partnern – auch bei der Finanzierung von Forschungsprojekten. Zu häufig sind (Forschungs-)Projekte kurzfristig angelegt und es findet kein echter Dialog zwischen Gebern und Empfängern statt.

Die deutsche und europäische Wissenschaftsförderlandschaft sollte gezielt inter- und transdisziplinäre Projekte im Bereich nachhaltigen Wassermanagements in unterschiedlichen Weltregionen und bezüglich verschiedener Managementherausforderungen fördern. Dies umfasst die wissenschaftliche Erarbeitung und lokal angepasste Innovationsentwicklung im Bereich der Bewässerungslandwirtschaft genauso wie städtische Wasserver- und -entsorgung, Behandlung von Abwasser sowie die Energieerzeugung durch Wasserkraft. Wichtig ist hierbei, auf transdisziplinäre Forschungsdesigns zu achten, in denen die transformative Co-Produktion von Wassermanagement-Wissen in enger Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen gefördert wird.

Als Instrument einer nachhaltigen klimaresilienten Governance sollten Dialogforen mit deliberativen Elementen institutionell aufgebaut und miteinander verknüpft werden. Beteiligung wirkt präventiv und hilft, das Konfliktpotenzial zwischen verschiedenen Akteuren zu verringern. Dies fördert zudem eine demokratisch gelebte

Praxis und kann innerhalb von Ländern und international zur Friedenssicherung beitragen. Dialogforen bieten zudem die Chance, diverse Wissensformen und Akteure (z. B. Städte, Verbände, religiöse Gemeinschaften und Unternehmen) in die Lösungssuche einzubinden.

Finanzierung auch für lokale Ansätze mobilisieren und vermitteln

Weltweit wurde der in den UN-Nachhaltigkeitszielen (SDG 6) vereinbarte sichere Zugang zu Trinkwasser und Sanitäreinrichtungen verbessert, aber auch heute müssen noch 2,2 bzw. 3,5 Mrd. Menschen darauf verzichten. In 140 Ländern müssten die Investitionen auf insgesamt über 100 Mrd. US-\$ pro Jahr verdreifacht werden, um die SDGs 6.1 und 6.2 bis 2030 zu erreichen (Hutton und Varughese, 2016); hinzu kommen Aufwände für den Wasserressourcenschutz und die Reduktion wasserbezogener Risiken (auch durch den Klimawandel). Der jeweilige Nutzen wird allerdings auf das Zweieinhalb- bis Siebenfache der Kosten geschätzt (UNESCO, 2024; GCA, 2019).

Zur Finanzierung werden öffentliche wie private Investitionen benötigt. Daher muss gerade auch privates Kapital stärker mobilisiert werden, insbesondere in Niedrigeinkommensländern, in denen z. B. nur 1,4 % der privaten Finanzmittel, die 2012–2017 mit Mitteln der Entwicklungszusammenarbeit gehebelt wurden, auf den Bereich Wasser und Abwasser entfielen (OECD, 2019b). Bereits heute zielen viele Strategien (z. B. der Weltbank, des BMZ sowie die deutsche Wasserstrategie) auf die Erhöhung der Attraktivität von Investitionen im Wassersektor und der Kreditwürdigkeit von Wasserversorgern ab. Fähigkeiten und Kapazitäten müssen vor allem bei öffentlichen Unternehmen und Institutionen für effiziente Planung, Investitionsabwicklung und Betrieb bzw. für Aufsicht und Regulierung aufgebaut werden. Aufgrund der beschriebenen wasserbezogenen Verschärfungen müssen aber auch die folgenden drei Handlungsfelder mehr Aufmerksamkeit erfahren.

Erstens sollten wasserbezogene Risiken transparent gemacht werden, um private und öffentliche Investitionen zu mobilisieren. Nur wenn Unternehmen, Investoren und Kommunen wasserbezogene Risiken und Auswirkungen ihrer Aktivitäten stärker berücksichtigen, werden sie vermehrt in deren Minderung investieren oder sich an Anstrengungen wie dem internationalen Klimaanpassungsfonds beteiligen. Die Bundesregierung sollte sich für eine Harmonisierung der nicht finanziellen Berichterstattung zu SDG 6 einsetzen, beispielsweise durch Unterstützung der International Platform on Sustainable Finance und eigene Aktivitäten. Aufbauend auf Erfahrungen mit der EU-Taxonomie und der Ausgestaltung „blauer“ Finanzinstrumente kann Deutschland dabei eine Vorreiterrolle einnehmen. Zum anderen sollten Informations- und Unterstützungsangebote zur Bewertung von

Wasserrisiken verbessert werden. Bessere Daten und langfristige Projektionen zu Wasseraufkommen, Wassernutzungen sowie regionalen und sektoralen Kopplungen sollten bedarfsorientiert erhoben, bereitgestellt, Kompetenzen zu deren Nutzung vermittelt und auch andere Länder dabei unterstützt werden. Klimatologische, meteorologische und hydrologische öffentliche Dienste und Forschungseinrichtungen müssen dafür gestärkt und vernetzt werden. Die Einrichtung eines digitalen und kostenfreien europäischen Zugangsportals (European Access Point, ESAP) sollte unterstützt werden. Öffentliche Unterstützungsangebote wie der Deutsche Nachhaltigkeitskodex sollten gestärkt und Erfahrungen dazu mit anderen Ländern ausgetauscht werden.

Zweitens sollte der Wassersektor durch stabile Entnahmequellen attraktiver gemacht werden. Die Nutzer von Wasser oder spezifischer Infrastrukturen (z. B. Hochwasserschutz) sollten ebenso wie die Verursacher von Schäden stärker an Kosten beteiligt werden. Dafür sollte zum einen die Bepreisung von Wasser umfassend, aber sozial ausgewogen sein und umweltbezogene Kosten mit abdecken. Ausnahmen bei Entnahmeentgelten sollten abgebaut werden. Zum anderen sollten Inverkehrbringer und Nutzer gewässerbelastender Stoffe stärker am Gewässerschutz beteiligt werden. In Deutschland und der EU gibt es hierfür im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung bereits Ansätze, die auf weitere Stoff- und Produktgruppen und -eigenschaften erweitert werden sollten. Deutschland sollte sich auch für eine EU-weite Pestizidabgabe einsetzen, die Umwelt- und Gesundheitsrisiken einbezieht und Stoffe mit höheren Risiken stärker belastet. Die Einnahmen können für Gewässerschutz, zur Abmilderung außergewöhnlicher Belastungen, z. B. für Landwirt:innen, sowie für Beratung zu alternativen Pflanzenschutztechniken verwendet werden. Die Bundesregierung sollte in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen den Aufbau von Kapazitäten zur Planung und Umsetzung von Preisreformen ebenso wie zur Einführung von Herstellerverantwortung und wasserbezogenen Umweltabgaben unterstützen.

Darüber hinaus sollten Maßnahmen mit Mehrgeinnen für die Allgemeinheit besser entlohnt werden. Öffentliche Kofinanzierung, Steuererleichterungen oder Subventionen können dabei Anreize für private Investoren erhöhen. Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU sollte ab 2028 so reformiert werden, dass sie die Erhaltung von Wasserressourcen und naturbasierte Maßnahmen mit Mehrgewinnen stärker fördert und Fehlanreize vermeidet. Die in der ersten Säule der GAP vorgesehenen Öko-Regelungen sollten auf Kosten der bisherigen flächengebundenen Direktzahlungen ausgebaut werden. Auch indirekt wasserwirksame Subventionen sollten wasserbezogene Mindeststandards erfüllen und könnten z. B. auf Basis der Do-No-Significant-Harm-Prinzipien

der EU-Taxonomie geprüft werden. Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen können, sofern sie die notwendigen institutionellen Voraussetzungen erfüllen, durch wasserbezogene Debt Swaps (Schuldenerlass unter Auflagen) bei der Einführung eines klimaresilienten Wassermanagements unterstützt werden.

Schließlich sollte die Einnahmengenerierung und -verwendung auf lokaler Ebene gestärkt werden. Aber auch Einnahmen aus zentral erhobenen Abgaben, z. B. auf wassergefährdende Produkte, sollten Kommunen und Städten anteilig zufließen, um daraus resultierende Aufgaben zu erfüllen (z. B. Wasseraufbereitung). Dies kann durch horizontale Ausgleichsmechanismen ergänzt werden, wenn Kosten und Nutzen lokaler Maßnahmen in unterschiedlichen Kommunen anfallen. In Mittel- und Niedrigeinkommensländern erfordert eine effizientere Erhebung und Verwendung von Einnahmen oftmals institutionelle und strukturelle Reformen, Korruptionsbekämpfung sowie mehr Transparenz und Rechenschaftspflicht.

Drittens sollten vermittelnde Institutionen (Intermediäre) und lokale Kooperationsplattformen strategisch gestärkt bzw. aufgebaut werden: Spezialisierte Banken, revolvingierende Wasserfonds, NGOs oder Forschungseinrichtungen können kleinere Projekte bzw. Wasser- und Landakteure sowie öffentliche und private Investoren „poolen“, zwischen ihnen vermitteln und geeignete Finanzierungen strukturieren. Mit Hilfe dieser Intermediäre sollten die EU, nationale und subnationale Regierungen lokale Austausch- und Kooperationsformate zwischen Stakeholdern und Geldgebern flächendeckend institutionalisieren. In diesen können eine gemeinsame Wissensbasis hergestellt, Strategien und Maßnahmen abgestimmt sowie Finanzierungen organisiert werden. Begleitend sollten öffentliche Kapazitäten und Best-Practice-Netzwerke für die Umsetzung ergebnisorientierter Blended-Finance-Ansätze aufgebaut und Vergütungsmodelle für Projekte mit ökologischen und sozialen Mehrgewinnen geplant, überprüft und skaliert werden.

Forschungsbedarf besteht u. a. zu (1) Projektionen potenzieller wasserbezogener Schäden, Anpassungskosten und Mehrgewinnen sowie der Modellierung von Unsicherheiten; (2) Auswirkungen möglicher wasserbezogener Schäden auf Volkswirtschaften und den Finanzsektor; (3) Möglichkeiten zur stärkeren Beteiligung institutioneller Investoren bei der Finanzierung wasserbezogener Ziele; (4) hybriden Finanzierungsinstrumenten und neuen Geschäftsmodellen für naturbasierte Ansätze; (5) der effizienten Bewertung lokaler Mehrgewinne naturbasierter Ansätze und ihrer systematischen Nutzung; (6) Wirkungen einer erweiterten Abgabenreform inklusive z. B. nicht beabsichtigten Belastungen Dritter oder Verlagerungen verschmutzungsintensiver Wirtschaftsaktivitäten.

Wissenschaft und Bildung für eine nachhaltige WasserZukunft

Dem Wissenschaftssystem kommt beim Umgang mit Herausforderungen und Verschärfungen eine zentrale Rolle zu. Besonders die durch den anthropogenen Klimawandel bedingte Nichtstationarität hydrologischer Regime erfordert die kontinuierliche Produktion von Wissen und Daten, die bei Innovationen zur Sicherung der Wasserbedarfe für Mensch und Ökosysteme berücksichtigt werden müssen. Nichtstationarität bedeutet, dass die Annahme, ein System weise eine vorhersagbare, aus empirischen Beobachtungen ableitbare Variabilität auf, nicht mehr haltbar ist. Wissenschaft kommt weiterhin verstärkt eine beratende und begleitende Rolle im Politikprozess zu. Die Komplexität und Veränderungsgeschwindigkeit der sozial-ökologischen Prozesse, verschärft durch den Klimawandel, verlangen gleichzeitig eine vorausschauende, lern- und anpassungsfähige lokale und globale Wassergovernance. Hierfür ist unabhängige, kritische Wissenschaft als Grundlage unerlässlich.

Die wissenschaftlichen Kapazitäten in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen sollten gestärkt werden. Internationale Forschungsk Kooperationen können zu deren Aufbau beitragen. Bislang sieht der rechtliche Rahmen in internationalen Wissenschaftskooperationen vor, dass sämtliche Personal-, Sach- und Reise-mittel in den Wissenschaftseinrichtungen der Geberländer verwaltet werden. Als Mittel zur Stärkung der Wissenschaftskapazitäten empfiehlt der WBGU, die rechtlichen Voraussetzungen zur direkten Mittelverwaltung inklusive Abrechnung und Prüfung in Partnerländern zu schaffen. Dies stärkt die Rolle der dort forschenden Wissenschaftler:innen und schafft Kapazitäten in der Mittelverwaltung. Eine weitere Maßnahme wäre, die rechtlichen Voraussetzungen zur Weiterleitung von Mitteln zu schaffen, mit geteilter Haftung zwischen den involvierten Partnerinstituten und dem Geber.

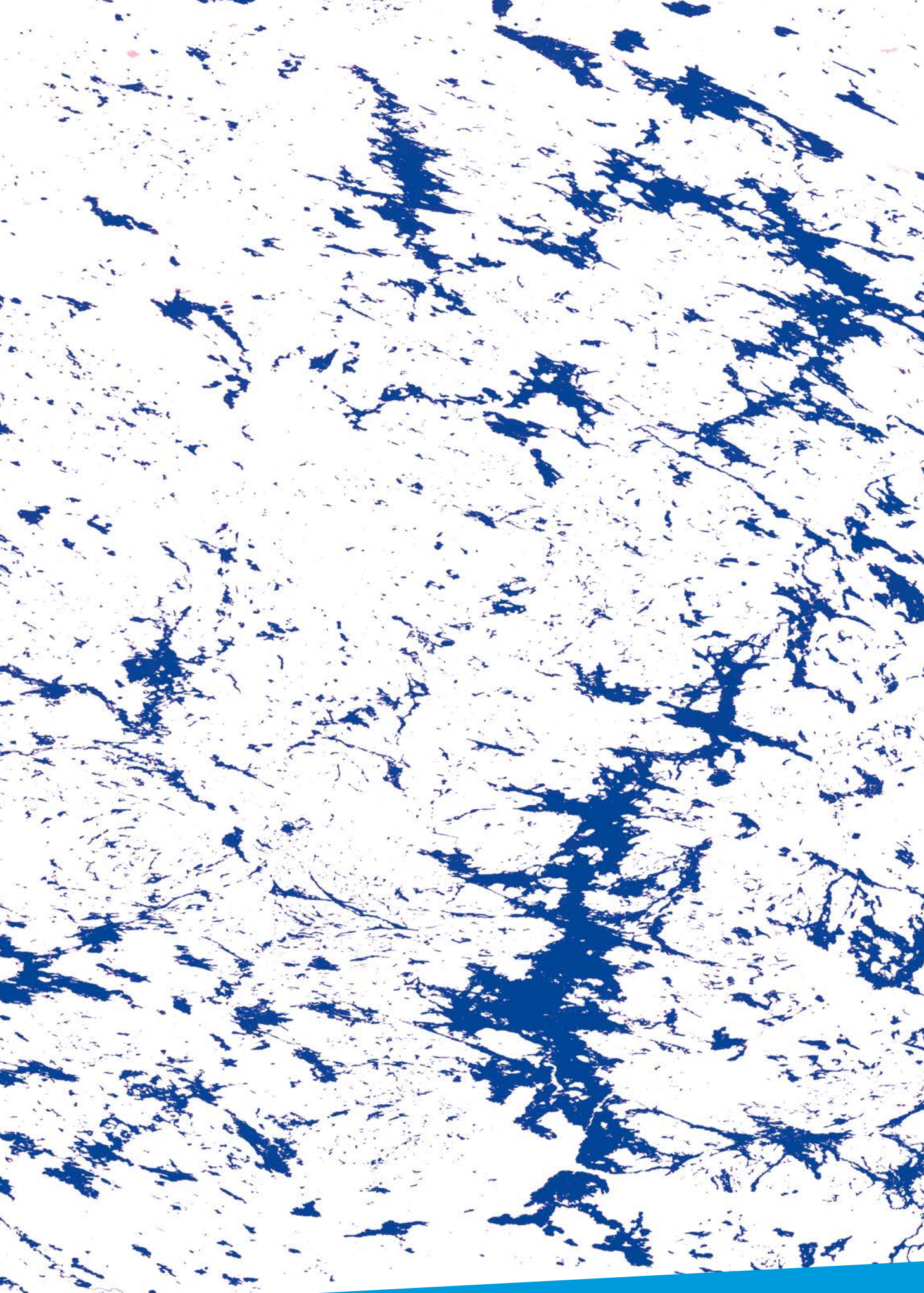
In Citizen Labs können Bürger:innen aktiv an wissenschaftlichen Forschungsprojekten teilnehmen. Durch die Einbindung der Bürger:innen in den Entscheidungsprozess können Citizen Labs, ähnlich wie deliberative Partizipationsprozesse, zu resilienteren Strukturen in Kommunen beitragen. Sie können maßgeschneiderte und durch transparente Entscheidungen akzeptierte Lösungen für lokale Herausforderungen wie Wasserknappheit finden und Wasserressourcen besser schützen. Der WBGU hält diese Form der Bürgerbeteiligung zum Schutz von Wasser und Biodiversität für sehr wichtig und plädiert für ihren weiteren Ausbau.

Bildung ist für den Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft im Allgemeinen sowie für die Vermeidung von Wasserkrisen im Speziellen essenziell. Maßnahmen wie Information, Aufklärung, die Aneignung von Wissen durch praktische Erfahrung oder öffentlicher Dialog

stärken das Bewusstsein für die Bedeutung der Ressource Wasser. Selbstbestimmtes Handeln und eine aktive Beteiligung an Politikprozessen werden durch ein besseres Verständnis der Zusammenhänge von Lebensweise, Wirtschaft und Wasserqualität ebenso gefördert wie durch Kenntnisse über die neuen, klimawandelbedingten Herausforderungen im Wassermanagement und die komplexen Zusammenhänge globaler Governance. Der WBGU empfiehlt, verstärkt Bildungsprogramme national und länderübergreifend zu initiieren sowie eine internationale Diskussion über neue Formen des Wirtschaftens und der Wertschätzung von Ökosystemleistungen anzuregen. Weiterhin sollten Beratungs- und Schulungsprogramme – auch auf Basis der Ergebnisse des Wissensaustauschs – auf regionaler Ebene durchgeführt und auf die Begebenheiten vor Ort zugeschnitten werden, um so das Bewusstsein für lokale Wasserprobleme zu schärfen und Akteure zum Umdenken sowie zu gezieltem Handeln zu befähigen. Das Thema Wasser ermöglicht Kindern und Jugendlichen durch lebensnahe Lerneinheiten unter anderem mehr zu Wasserkreisläufen, der Wasserversorgung, der Bedeutung von Wasser für Mensch und Natur sowie den Folgen des Klimawandels zu erfahren. Es gibt bereits eine große Zahl an Lehrmaterialien für alle Altersstufen und Schularten. Der WBGU empfiehlt auf Grund der überragenden Bedeutung des Themas Wasser, dass Lehrpläne über das gesamte Schulspektrum hinweg sich des Themas fächerübergreifend verpflichtend annehmen.

Ausblick

Mit der UN-Wasserkonferenz 2023 und der Gründung der G7-Wasserkoalition im Jahr 2024 hat das Thema „Wasser in einer aufgeheizten Welt“ international neuen Aufwind bekommen. Dieses Momentum gilt es nun zu nutzen. Insbesondere sollten die für 2026 und 2028 anberaumten UN-Wasserkonferenzen helfen, die globale Bedeutung von Wasser politisch höher auf die Agenda zu setzen und Beschlüsse zu einer robusten Verankerung des Themas in der internationalen Nachhaltigkeitspolitik fassen. Dieses Gutachten will hierzu einen Beitrag leisten.



Einleitung

Sommer 2024: In den letzten sechs Monaten war Deutschland bereits von drei schweren Hochwassern betroffen. Februar und März waren die wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnung. Das immer häufigere Auftreten von Jahrhundert-Extremereignissen wird zur neuen Normalität im Wassersektor: In den Jahren 2022 und 2023 wurde in 22 Ländern weltweit der Dürrenotstand ausgerufen, immer mehr Städte und Regionen erklären zumindest zeitweilig den Wassernotstand, während sich andernorts außergewöhnlich schwere Sturzfluten und Hochwässer ereignen. Wesentliche Ursachen dieser Entwicklungen sind drastische Umgestaltungen und eine großflächige Zerstörung von Naturräumen sowie die weltweite Urbanisierungsdynamik, die zu Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt geführt haben. Hinzu kommen ein vielfach nicht adäquates Wassermanagement sowie die immer spürbareren Auswirkungen des Klimawandels. Auch die Verschmutzung der Wasserressourcen ist mitnichten überwunden: In vielen Regionen der Erde hat sich die Gewährleistung einer sicheren Wasserver- und -entsorgung deutlich verbessert, aber ein substanzieller Anteil der Weltbevölkerung hat weiterhin keinen adäquaten Zugang zu diesen Dienstleistungen. Zusätzlich belasten synthetische Schadstoffe die Ökosysteme, wodurch zunehmend Wassernutzungen eingeschränkt werden und gesundheitliche Belastungen auftreten. Es entwickeln sich neue regionale Wassernotlagen, die sich in anderen Weltregionen wiederholen und so zu einem planetaren Muster werden, z. T. mit Auswirkungen weit jenseits bisheriger menschlicher Erfahrungshorizonte. Hier setzt der WBGU an und fragt, wie der Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit möglichst groß gehalten und wie sich die Weltgemeinschaft an die Geschwindigkeit und Wucht dieser Veränderungen im Wasserbereich anpassen kann.

Es gibt eine Vielzahl bewährter kooperativer Ansätze und Aktivitäten zur Umsetzung nachhaltiger Wassernutzung. Durch die Einigung auf die Agenda 2030 im Jahr 2015 haben diese eine zusätzliche Basis erhalten. Hinzu kommen völkerrechtliche Übereinkommen für grenzüberschreitenden Gewässerschutz, die seit vielen Jahren wertvolle Beiträge zur Sicherung natürlicher Wasserressourcen leisten. Doch inzwischen haben der

Klimawandel und seine Folgen für den globalen Wasserkreislauf die Anforderungen an die globale Wasserpolitik verschärft. Die internationale Wasserdiplomatie beginnt bereits, darauf zu reagieren: Im Jahr 2023 fand seit 46 Jahren erstmals wieder eine UN-Wasserkonferenz statt. In den Jahren 2026 und 2028 werden auf Beschluss der UN-Generalversammlung die nächsten Weltwasserkonferenzen folgen. 2026 steht die Umsetzung des Nachhaltigkeitsziels zu sauberem Wasser und Sanitärversorgung (SDG 6) im Mittelpunkt, 2028 wird es um die Förderung von Umsetzungsmaßnahmen im Wasserbereich und um eine Bilanz der UN-Wasserdekade (2018–2028) gehen.

Im Jahr 2024 haben die G7-Staaten erstmalig eine Wasserkoalition ins Leben gerufen. Auch im Rahmen der internationalen Klimapolitik spielen die Auswirkungen auf den Wasserkreislauf der Erde eine zunehmend wichtige Rolle. Auf europäischer Ebene wird ein EU Blue Deal diskutiert, vorgeschlagen vom Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss. Deutschland hat 2023 erstmals eine Nationale Wasserstrategie verabschiedet.

Insgesamt stellt sich die Frage, ob die internationale Wasserdiplomatie ebenso wie die Strategien auf unterschiedlichen Politikebenen der Dimension der globalen Wasserkrise heute und in Zukunft angemessen gerecht werden. Bisher erscheint die globale Wassergovernance eher fragmentiert, finanziell unterausgestattet und wenig durchsetzungsfähig. Erschwerend kommt hinzu, dass den wachsenden globalen Gestaltungsherausforderungen ein durch Krisen geschwächtes multilaterales System gegenübersteht.

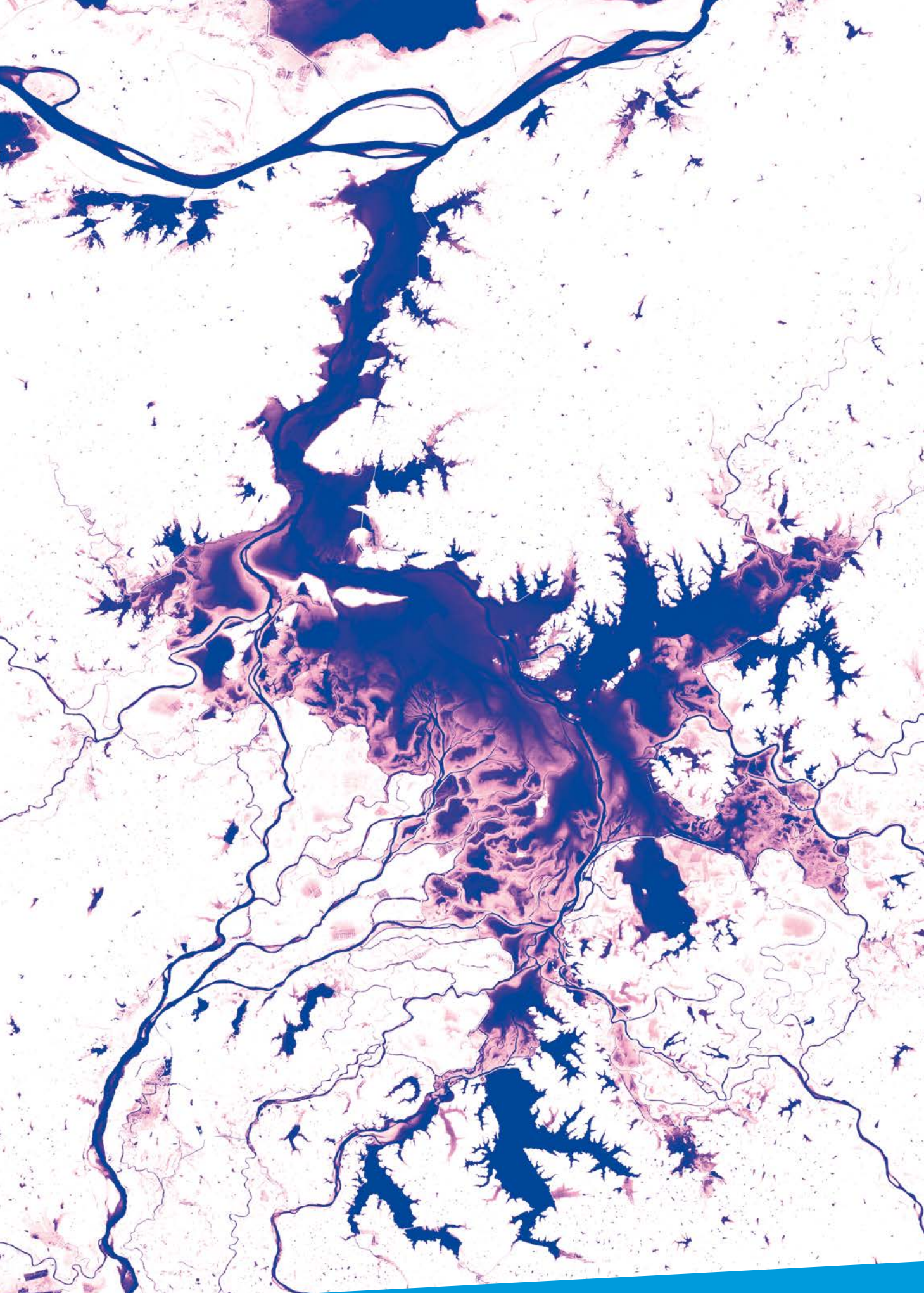
Welche Bedeutung kommen in einem klimaresilienten Wassermanagement dem gestaltenden Staat und gesellschaftlichen Formen der Selbstorganisation zu? Wie können die beabsichtigen politischen Ziele und Maßnahmen ausreichend finanziell hinterlegt werden und wie können öffentliche und private Akteure dazu angemessen beitragen? Können die Ziele im erforderlichen Zeitrahmen um- und durchgesetzt werden?

Da die Menschheit den globalen Wasserkreislauf bereits so stark verändert hat, dass Erfahrungswissen immer weniger zur Lösung der Herausforderungen ausreicht, steht auch die Wissenschaft in einer besonderen

1 Einleitung

Verantwortung, was die Bereitstellung von Handlungs- und Orientierungswissen angeht. Durch den Klimawandel werden sich der Wasserkreislauf und mit ihm die lokale Wasserverfügbarkeit fortlaufend ändern – es geht folglich nicht um die Anpassung an einen neuen Zustand, sondern um einen fortlaufenden Anpassungsprozess, der immer wieder nachgesteuert werden muss. Dafür ist nicht nur politische Beratung relevant, sondern auch Gesellschaftsberatung: Das Management der Wasserressourcen gestaltet sich oft informell und lokal, basierend auf generationenübergreifendem Wissen. Dieses Wissen kann und sollte proaktiv in die Erarbeitung lokal und regional wirksamer Lösungsansätze eingebunden werden. Für die Bewältigung von Extremereignissen muss stärker auf die Unterstützung durch Prognosen und wissenschaftliche Zukunftsszenarien zurückgegriffen werden. Die Wissenschaft ist hier in einer vorausschauenden und begleitenden neuen Rolle gefordert: Was sind mögliche Grenzen der Beherrschbarkeit in einer Region und welche Vorsorgeoptionen bestehen, um den Abstand von nicht tolerablen Entwicklungen möglichst groß zu halten? Hieraus erwachsen auch neue Forschungsthemen.

Ziel dieses Gutachtens ist, Vorschläge für ein klimaresilientes Wassermanagement und eine internationale Wassergovernance zu entwickeln, die den skizzierten Herausforderungen gerecht werden und neue Wege für friedenssichernde Kooperation aufzuzeigen. Die UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 bieten eine herausragende Gelegenheit, dieses global bedeutsame Thema von hoher Dringlichkeit auch international sichtbarer zu machen und langfristige, gemeinsame Ziele zu vereinbaren.



Status quo im Umgang mit der Ressource Wasser

2

Der Mensch beeinflusst den natürlichen Wasserkreislauf massiv. Wasser wird vielerorts verschmutzt, übernutzt und ungerecht verteilt. Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme und Menschen sind bereits weltweit spürbar. Milliarden Menschen haben noch immer keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser oder sanitärer Versorgung, sind von Überflutungen betroffen oder leiden unter Wassermangel. Nutzungsmuster sind durch politische Rahmenbedingungen und die Wasserinfrastruktur geprägt – dabei gibt es ausgeprägte Pfadabhängigkeiten, die Kurskorrekturen und substanzielle Veränderungen erschweren.

Wasser ist Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen und ein stabiler Wasserkreislauf ist als Grundlage für die Erhaltung der Funktionalität wasserbezogener Ökosysteme essenziell. Diese Funktionen sind bereits heute beeinträchtigt – durch die Zerstörung aquatischer Ökosysteme, die historisch gewachsenen Muster der Wassernutzung, Veränderungen im globalen Wasserkreislauf sowie immer häufiger auftretende Extremereignisse wie Sturzfluten und Dürren. Wasser wird vielerorts verschwendet, übernutzt und ungerecht verteilt. Eine wachsende Verschmutzung mit langlebigen Substanzen schränkt die Wassernutzung weiter ein, so dass eine einwandfreie Trinkwasserversorgung vielfach nicht mehr sichergestellt ist. Nutzungsmuster sind durch politische Rahmenbedingungen und die existierende Wasserinfrastruktur geprägt – dabei gibt es ausgeprägte Pfadabhängigkeiten, die Kurskorrekturen und substanzielle Veränderungen erschweren.

Global entfallen 72 % aller Süßwasserentnahmen auf die Landwirtschaft, 15 % auf die Industrie und 13 % auf die Kommunen und Haushalte (AQUASTAT, 2024). Der Anteil der Wasserentnahme für die Landwirtschaft an der Gesamtentnahme variiert jedoch regional und nach Einkommensniveau erheblich. In Hoheinkommensländern sind es im Durchschnitt nur 41 % der gesamten Entnahmen, in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen dagegen 80–90 % (Ritchie und Roser, 2017). Die Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft, deren Fläche sich von 1961–2018 mehr als verdoppelt hat

(UNESCO, 2024), und der Wasserbedarf einer wachsenden Stadtbevölkerung haben in vielen Regionen und Städten der Welt zur einer Übernutzung von nicht erneuerbarem Grundwasser (Tiefengrundwasser) und einer zunehmenden Absenkung des Grundwasserspiegels geführt (Herbert und Döll, 2019). Besonders betroffen sind der Nahe und Mittlere Osten, Nordafrika, Indien, Nordchina sowie der Südwesten der USA (Herbert und Döll, 2019; de Graaf et al., 2017; Wada et al., 2012). In den meisten dieser Regionen machte der Wasserverbrauch für Bewässerung der Landwirtschaft von 1960–2010 durchschnittlich über 90 % des gesamten Wasserkonsums aus und mindestens die Hälfte davon stammte aus nicht erneuerbarem Grundwasser (Wada und Bierkens, 2014).

Rund 2,2 Mrd. Menschen haben keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser – vor allem Länder niedrigen und mittleren Einkommens sind betroffen (UNESCO, 2024). Dabei ist vor allem in ländlichen Gebieten die Versorgungslage schwierig: Dort haben vier von fünf Menschen keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser. Rund 3,5 Mrd. Menschen haben keinen Zugang zu angemessener sanitärer Versorgung. Mittel der öffentlichen Entwicklungsleistungen (ODA) für den Wassersektor lagen im Jahr 2022 mit 9,1 Mrd. US-\$ mehr als 4 % unter ihrem Maximum von 2018 (UN Water, 2024).

Zwischen 2002 und 2021 waren 1,6 Mrd. Menschen von Überflutungen betroffen, und rund 100.000 verloren ihr Leben. Im gleichen Zeitraum litten 1,4 Mrd. Menschen

unter Dürren, mit rund 21.000 Toten (UNESCO, 2024). Rund die Hälfte der Weltbevölkerung leidet derzeit zumindest einen Teil des Jahres unter schwerem Wassermangel (IPCC, 2023a).

In vielen Regionen der Erde hat sich die Gewährleistung einer sicheren Wasserver- und -entsorgung deutlich verbessert, aber ein substanzieller Anteil der Weltbevölkerung hat weiterhin keinen adäquaten Zugang zu diesen Dienstleistungen: Für mindestens 3 Mrd. Menschen ist die Wasserqualität wegen mangelnder Überwachung ungewiss (UN, 2022). Eine Gefährdung durch pathogene Mikroorganismen durch verschmutztes Trinkwasser betrifft immer noch 2 Mrd. Menschen weltweit.

Neben den Wirkungen vor Ort kann es über den Handel mit Gütern, für deren Herstellung Wasser benötigt wird, auch zu Fernwirkungen kommen. Das zur Herstellung von Gütern benötigte und das in den Gütern enthaltene Wasser lassen sich als virtuelle Wasserströme über den Globus verfolgen. Etwa 65–90 % der weltweiten Ströme virtuellen Wassers stammen aus dem Handel mit Agrarprodukten, gefolgt mit deutlichem Abstand von der Industrie und dem Energiesektor (d’Odorico et al., 2019; Hoekstra und Mekonnen, 2012). Besonders Länder mit hohen Agrarexporten exportieren somit indirekt auch das eigene Wasser.

2.1

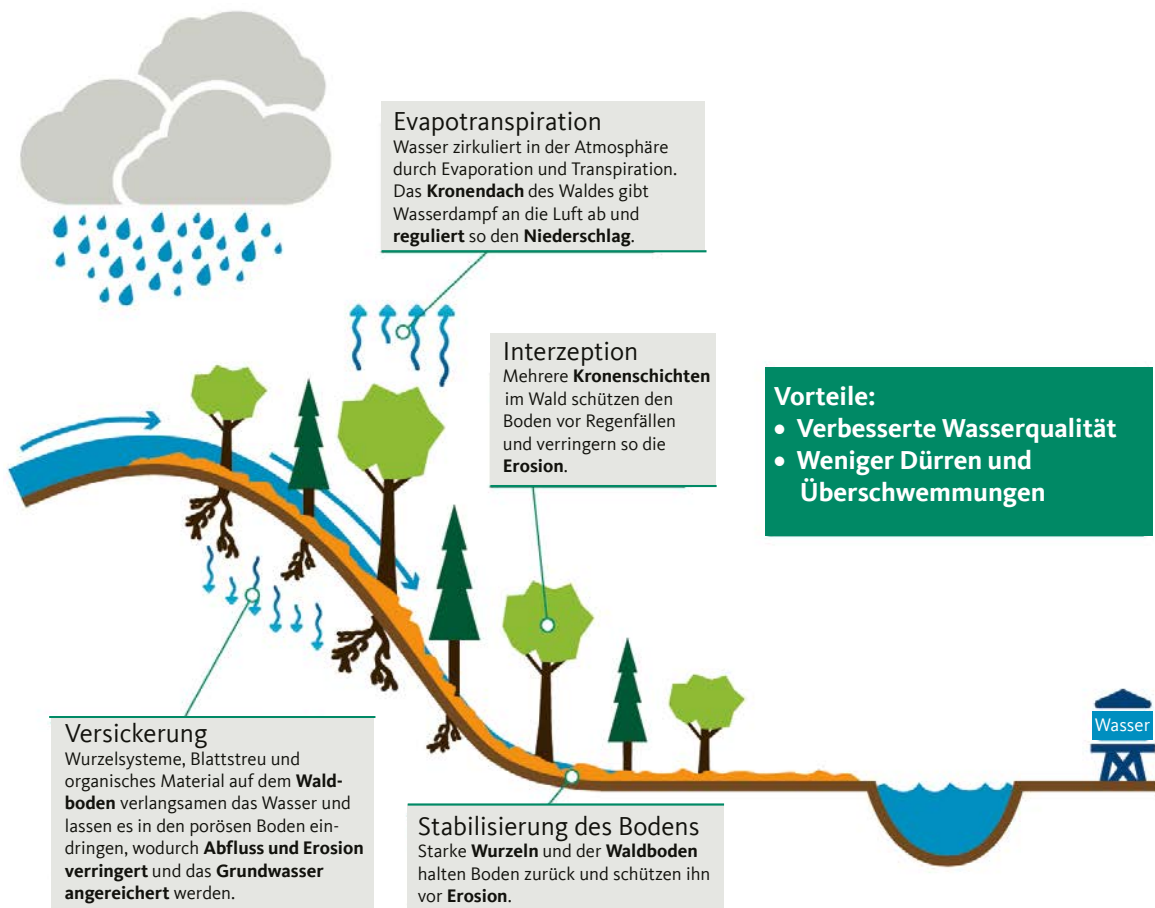
Wasser: Essenzielle Ressource für alles Leben und die Rolle der Ökosysteme

Wasser ist der „Blutkreislauf der Biosphäre“ (Ripl, 2003). Alles Leben ist im Wasser entstanden, hat sich im Meer, an Land und im Süßwasser weltweit verbreitet und ist in allen Lebensräumen zumindest zeitweise auf die Verfügbarkeit von ausreichend Wasser genügend hoher Qualität angewiesen. Biologisch aktive Organismen bestehen zu einem erheblichen Anteil aus Wasser, der möglichst konstant gehalten werden muss. Bei einem erwachsenen Menschen beträgt dieser Anteil knapp 60 %, bei einigen Organismen kann er mehr als 90 % betragen. Wasser wird mehr oder weniger kontinuierlich vom Organismus aufgenommen und mit den Ausscheidungen wieder abgegeben. Die spezifischen Konzentrationen von Mineralien im Wasser, in den Körperflüssigkeiten sowie ihr Austausch über die Grenzflächen des Körpers spielen eine wesentliche Rolle bei der Aufrechterhaltung von Zell- und Gewebefunktionen, repräsentieren aber auch Grenzbedingungen, bei deren Überschreitung ein Überleben nicht mehr möglich ist. So leben marine Organismen bei Salzkonzentrationen, die für landlebende Organismen und Süßwasserorganismen zu hoch und oft lebensbedrohlich sind. Für einen Organismus ist daher die ausreichende Verfügbarkeit unbelasteten oder wenig

belasteten („genießbaren“) Wassers, mit verträglichen und je nach Lebensraum charakteristischen, mehr oder weniger stabilen Konzentrationen essenzieller Mineralien, Voraussetzung für Gesundheit und Überleben.

Die Verfügbarkeit von Wasser charakterisiert verschiedene Lebensräume, die Organismen sind daran angepasst. So gibt es Lebensformen, die Trockenstadien ausbilden und auf diese Weise periodische Wasserarmut passiv überdauern, andere tolerieren regelmäßige Überflutungen. Vor allem in terrestrischen Lebensräumen schränken wasserbezogene Extrembedingungen wie langanhaltende Dürren oder auch Überflutungen das Überleben ein. Der Mensch hat zwar unterschiedlichste Lebensräume besiedelt, kommt aber mit großen Schwankungen der Wasserverfügbarkeit nicht gut zurecht und ist auf regelmäßige Wasserverfügbarkeit angewiesen. Die Abhängigkeiten reichen vom individuellen Überleben über die Sicherung der Ernährung bis hin zu wirtschaftlichen und industriellen Aktivitäten, die durch extreme Schwankungen der Wasserversorgung bedroht werden. In der Evolutionsgeschichte hat sich laut Timmermann et al. (2022) der *Homo sapiens* im Vergleich zu anderen Menschenarten u. a. durch seine Fähigkeit durchgesetzt, mit trockenen Bedingungen besser zurecht zu kommen, doch bleibt die Sicherung der Wasserversorgung Teil der existenziellen Zwänge der Menschheit. Extremer Wassermangel und die Verschlechterung der Wasserqualität, oft im Zusammenhang mit Veränderungen des damaligen Klimas, hat in der Menschheitsgeschichte wiederholt zum Zusammenbruch von Zivilisationen wie des antiken Reiches der Maya oder der antiken arabischen Zivilisation beigetragen (Falkenmark et al., 2019). Die wasserbedingte Gefährdung lebenswichtiger Systeme, z. B. der Zusammenbruch von Nahrungsmittelsystemen aufgrund langanhaltender Dürren, hat das Potenzial, Gesellschaften zu destabilisieren und Migration auszulösen (Cissé et al., 2022). So hat eine vier Jahre anhaltende Dürre verbunden mit einem Anstieg von Nahrungsmittelpreisen und Mangelernährung möglicherweise zu Instabilität, Migration und auch zu einer Verschärfung von Konflikten im Kontext des Syrienkriegs beigetragen (Gleick, 2014; Falkenmark et al., 2019; Cissé et al., 2022).

Ökosysteme mit ihrer Biodiversität sind ein wichtiger Teil des globalen Wasserkreislaufs (Tab. 2.1-2). Alle Ökosysteme erfordern und agieren mit Wasser. Sie stellen Süßwasser bereit, indem sie Wasser transportieren, filtern und speichern. Das natürlich vorkommende Boden- und Regenwasser, das von Pflanzen aufgenommen und verdunstet wird („grünes Wasser“; Kap. 2.2.1), ist eine kritische Größe für die Erhaltung von Ökosystemen (Hoekstra et al., 2011; Wang-Erlandsson et al., 2022). Eine ausreichende Versorgung mit Wasser ist ein Kennzeichen gesunder aquatischer wie auch terrestrischer Ökosysteme. Ökosysteme wie Moore und Wälder haben

**Abbildung 2.1-1**

Der Einfluss natürlicher Infrastrukturen auf die Wassersicherheit. Natürliche Infrastrukturen wie Feuchtgebiete oder Wälder tragen zur Wasserversorgung bei, indem sie das Wasser reinigen und Grundwasserspeicher wieder auffüllen. Sie regulieren auch den Wasserfluss und puffern damit die Auswirkungen von Überschwemmungen oder Dürren ab, regulieren Niederschläge, stabilisieren den Boden und verringern damit Erosion.

Quelle: Qin und Gartner, 2016

eine wichtige Rolle bei der Speicherung von Wasser und Kohlenstoff. Neben den Meeren beeinflussen auch Wälder die Intensität und Verteilung von Niederschlägen. Wälder und Süßwasserökosysteme mildern in ihrer Funktion als Pufferspeicher zugleich die Auswirkungen von Extremereignissen, z. B. durch Schutz vor Erosion und Überschwemmungen (Überflutungszonen) oder durch die Regulierung des Wasserabflusses, beispielsweise während Trockenperioden. Ökosysteme mit ihren Organismen können demnach eine natürliche („grüne“) Infrastruktur bereitstellen, die helfen kann, die Auswirkungen von Extremereignissen abzumildern (Smakhtin, 2018). Weitere wichtige Funktionen sind die natürliche Grundwasserneubildung durch Versickerung und die damit verbundene Verbesserung der Wasserqualität (Abb. 2.1-1) sowie eine Regulierung des lokalen Mikroklimas.

Wasser hat damit grundlegende Funktionen für die Erhaltung der Biosphäre. Es ermöglicht neben regulierenden

Ökosystemleistungen insbesondere auch existenziell wichtige materielle Ökosystemleistungen wie die Bereitstellung von Trinkwasser. Wasser ist auch Lebensraum und beherbergt wichtige Nahrungsketten, die letztendlich auch Nahrung für den Menschen bereitstellen. Zu den nicht materiellen Leistungen zählen z. B. kulturell-spirituelle und identitätsstiftende Beiträge (Vari et al., 2022; Wang-Erlandsson et al., 2022; Tab. 2.1-1).

Auch nicht materielle oder kulturelle Leistungen gesunder Ökosysteme, wie der Erholungswert durch Aktivitäten wie Wandern in wasserreicher Umgebung, Schwimmen oder Angeln, die spirituelle Bedeutung sowie ihr symbolischer und ästhetischer Wert sind wichtige Funktionen von Wasser (Vari et al., 2022). Träger vieler dieser Funktionen ist die Biodiversität der Ökosysteme. Trotz ihres im Verhältnis zur gesamten Erdoberfläche kleinen Anteils sind Süßwasserökosysteme und insbesondere die Binnengewässer Heimat für viele Pflanzen- und

2 Status quo im Umgang mit der Ressource Wasser

Tabelle 2.1-1

Ökosystemleistungen von Süßwasserökosystemen. Gezeigt sind Ökosystemleistungen von Süßwasserökosystemen mit ausgewählten Beispielen, gruppiert nach regulierenden, materiellen und nicht materiellen Leistungen.

Quelle: WBGU, basierend auf Vari et al., 2022; Lynch et al., 2023; IPBES, 2019a

REGULIEREND	Schaffung und Erhaltung von Lebensräumen Bereitstellung von Laich- bzw. Brutplätzen, pflanzlichen Habitaten, Nährstoffrecycling, Sauerstoffproduktion durch Photosynthese
	Regulierung des Klimas Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff; regionale Wirkung auf das Mikroklima, z. B. durch Kühlung von Siedlungen durch Blauräume
	Regulierung der verfügbaren Süßwassermenge Regulierung von Menge, Ort und Zeitpunkt von Oberflächen- und Grundwasserabflüssen
	Regulierung der Qualität von Süßwasservorkommen und Küstengewässern Natürliche Bindung, Filterung oder mikrobielle Beseitigung von Schadstoffen oder überschüssigen Nährstoffen
	Regulierung von Gefahren und Extremereignissen Milderung der Auswirkungen von Überschwemmungen oder Dürren
	Regulierung der Luftqualität Filtern von Feinstäuben aus der Luft durch die Vegetation, z. B. in Sumpf- oder Auenwäldern
MATERIELL	Materialien zur Energiegewinnung Versorgung mit Brennholz oder Torf
	Nahrungs- und Futtermittel Versorgung mit Trinkwasser und Nahrungsmitteln wie Fischen, Weichtieren oder Süßwasseralgen
	Materialien Bereitstellung von Holz, Fasern aus Schilf, inklusive der Böden für deren Anbau
	Medizinische, biochemische und genetische Ressourcen Produktion (veterinär-)medizinischer oder pharmazeutischer Inhaltsstoffe aus Süßwasserorganismen, Nutzung von Geninformationen für die Zucht von Pflanzen und Tieren
	Nutzung von Wasserläufen Transportwege für die Binnenschifffahrt oder Energiegewinnung durch Wasserkraft
NICHT-MATERIELL	Bildung und Inspiration Grundlage religiöser und spiritueller Erfahrungen oder sozialen Zusammenhalts durch die Existenz spiritueller Orte. Ermöglicht Persönlichkeitsentwicklung, etwa durch Bildung und Wissenserwerb sowie die Entwicklung von Fertigkeiten für Wohlbefinden, Information und Inspiration
	Physische und psychologische Erfahrungen und Erholung Landschaftserlebnis, z. B. in der Freizeit, mit den damit verbundenen positiven gesundheitlichen Auswirkungen
	Ortsverbundenheit Grundlage für Gefühle von Heimat, Zugehörigkeit und Verwurzelung, die z. B. durch Süßwasserökosysteme vermittelt werden und als Grundlage für Erzählungen, Rituale und Feste dienen

Tierarten (Dudgeon et al., 2006). Süßwasserökosysteme können auch Lebensraum für eine spezialisierte Fauna und Flora sein, wie etwa in Mooren.

2.2

Globaler Wasserkreislauf unter menschlichem Einfluss

Wasser durchläuft auf der Erde einen kontinuierlichen, globalen Kreislauf, der in Form von Niederschlägen über Land immer wieder neu Süßwasser zur Verfügung stellt. Seine grundlegenden Verdunstungs- und Kondensationsprozesse werden durch die Sonne, die Schwerkraft der Erde, die Verteilung der Landmassen und die großräumige Zirkulation der Atmosphäre aufrechterhalten. Der Mensch beeinflusst diesen natürlichen Kreislauf mittlerweile durch eine Vielzahl von Aktivitäten, bei denen Wasser entnommen, genutzt und abgeleitet wird bzw. zurückfließt, wodurch sich u. a. Verdunstung, Niederschläge, Grundwasserneubildung und Abflussverhalten verändern. Globale Klimaveränderungen beeinflussen den gesamten Wasserhaushalt von der globalen bis zur regionalen Ebene (Kap. 2.2.1.2). Außerdem greift der Mensch durch Veränderungen von Landflächen direkt in den Wasserkreislauf ein. Dazu zählen Landschaftsveränderungen durch land- und forstwirtschaftliche Nutzungen, industrielle Produktionsflächen, Bergbau,

Flächenversiegelung durch Besiedlung und Verkehrsflächen sowie die Umgestaltungen von Gewässern, z. B. Flussbegradigungen, Stauanlagen, Deiche und Talsperren. In der Konsequenz werden Verdunstung, Niederschläge und Abflüsse zeitlich wie räumlich umverteilt (Abb. 2.2-1; UBA, 2017; GCEW, 2023b). Landnutzungsänderungen beeinflussen auch Niederschläge und Flussläufe weit über die lokale Ebene hinaus (Wang-Erlandsson et al., 2018).

Weitere anthropogene Einflüsse umfassen Stoffeingleitungen in Oberflächen- und Grundwasser über unzureichend behandelte Abwässer aus Haushalten, Gewerbe und Industrien, die Entsorgung von Abfällen oder die Überdüngung landwirtschaftlich genutzter Flächen. Emissionen aus unterschiedlichen Sektoren wie Verkehr, Energieerzeugung, Industrie und Haushalten führen zu einem direkten Eintrag von Stoffen in das Wasser oder in die Atmosphäre, die nach Deposition zu nachteiligen Effekten auf Vegetation, Böden und Grundwasser führen können.

2.2.1

Wasser umfassend gesehen – blaues und grünes Wasser

Die erneuerbaren Wasserressourcen in einer Region, die sich aus Niederschlag, Verdunstung und Zu- und Abflüssen ergeben, bestimmen das Wasserdargebot und damit die Menge an Grund- und Oberflächenwasser, die sich

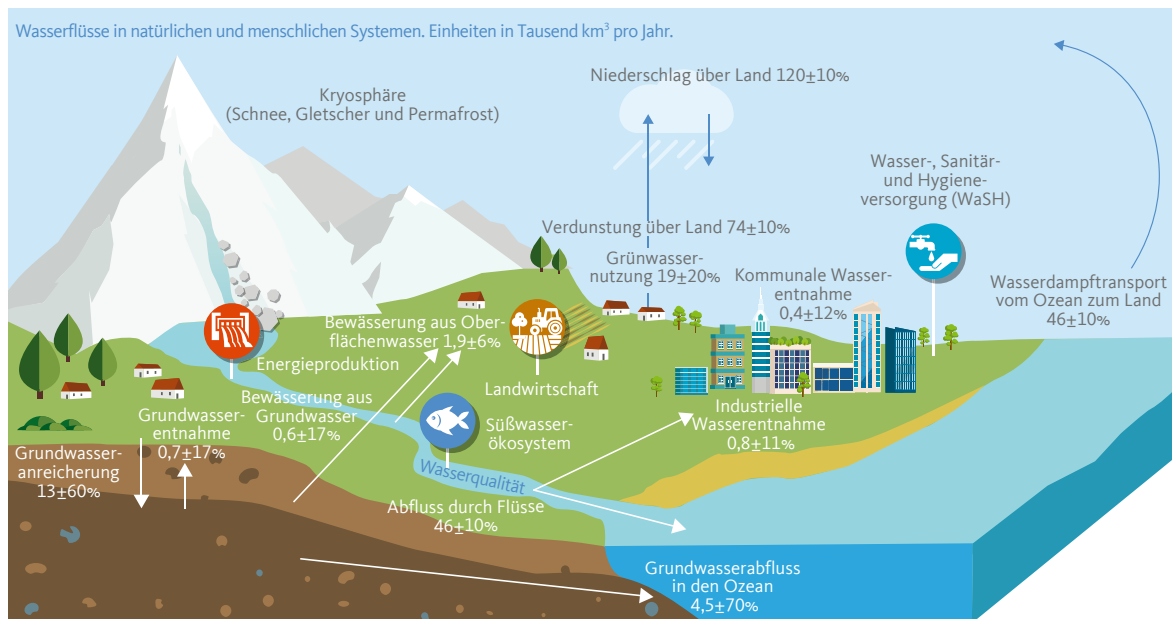


Abbildung 2.2-1

Der Wasserkreislauf einschließlich direkter menschlicher Eingriffe: Die Nutzung grünen Wassers bezieht sich auf die Nutzung der Bodenfeuchte, für Bewässerung wird blaues Wasser genutzt.

Quelle: Caretta et al., 2022: 565

2 Status quo im Umgang mit der Ressource Wasser

zeitabhängig theoretisch nutzen lässt (BMU und UBA, 2017). Das Wasserdargebot ist regional und saisonal unterschiedlich verteilt und kann in Relation zum Bedarf in Wasserknappheit oder -überschuss resultieren (Raskin, 1997; UBA, 2022c). Hierbei sind sowohl die Bedarfe für menschliche Nutzungen als auch die Bedarfe für funktionierende Ökosysteme relevant (Kap. 2.2.2). Wasserstress durch Knappheit entsteht daher abhängig vom Verhältnis zwischen der gesamten Süßwasserentnahme durch alle Nutzungen und den gesamten erneuerbaren Süßwasserressourcen nach Berücksichtigung des ökologischen Wasserbedarfs (FAO und UN Water, 2021: 9). Die FAO spricht im Rahmen der Agenda 2030 von Wasserstress, wenn mehr als 25 % der Süßwasserressourcen in einem Gebiet entnommen wurden (FAO und UN Water, 2021: 9).

Eine umfassendere Sicht auf die Wasserressourcen einer Region ergibt sich bei einer Unterscheidung der Wasserressourcen nach blauem und grünem Wasser (Abb. 2.2-2). Blaues Wasser umfasst alle Wasserressourcen in Flüssen, Seen, Talsperren und Grundwasser (Falkenmark und Rockström, 2006; Wang-Erlandsson et al., 2022). Grünes

Wasser bezeichnet die für Pflanzen verfügbare Bodenfeuchte; regnet es über Landflächen, wird ein Teil des Wassers im Boden aufgenommen und gespeichert, und steht anschließend Pflanzen zur Verfügung. Der andere Teil verdunstet von der Boden- oder Pflanzenoberfläche, oder fließt ab und geht in blaues Wasser über; dies ermöglicht auch die spätere Nutzung flussabwärts durch den Menschen (Abb. 2.2-2; Falkenmark und Rockström, 2004; zu Details und z. T. abweichenden Definitionen des Konzepts des grünen Wassers siehe Ringersma et al., 2003). Rockström et al. (2023b) beziffern den Anteil des Niederschlags über Land, der als blaues Wasser zur Verfügung steht, mit 35 %. Sowohl blaues als auch grünes Wasser ermöglichen ökologische Funktionen und somit Ökosystemleistungen (Kap. 2.2.2) und sind daher Voraussetzung für menschliches Überleben und gesellschaftliche Entwicklung (Falkenmark und Rockström, 2006; Falkenmark und Rockström, 2004: 6; Rockström et al., 2023b). Für die Regulation des globalen Wasserkreislaufs bedarf es eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen grünem und blauem Wasser, nicht nur für die Sicherstellung einer globalen Niederschlagsmenge oder

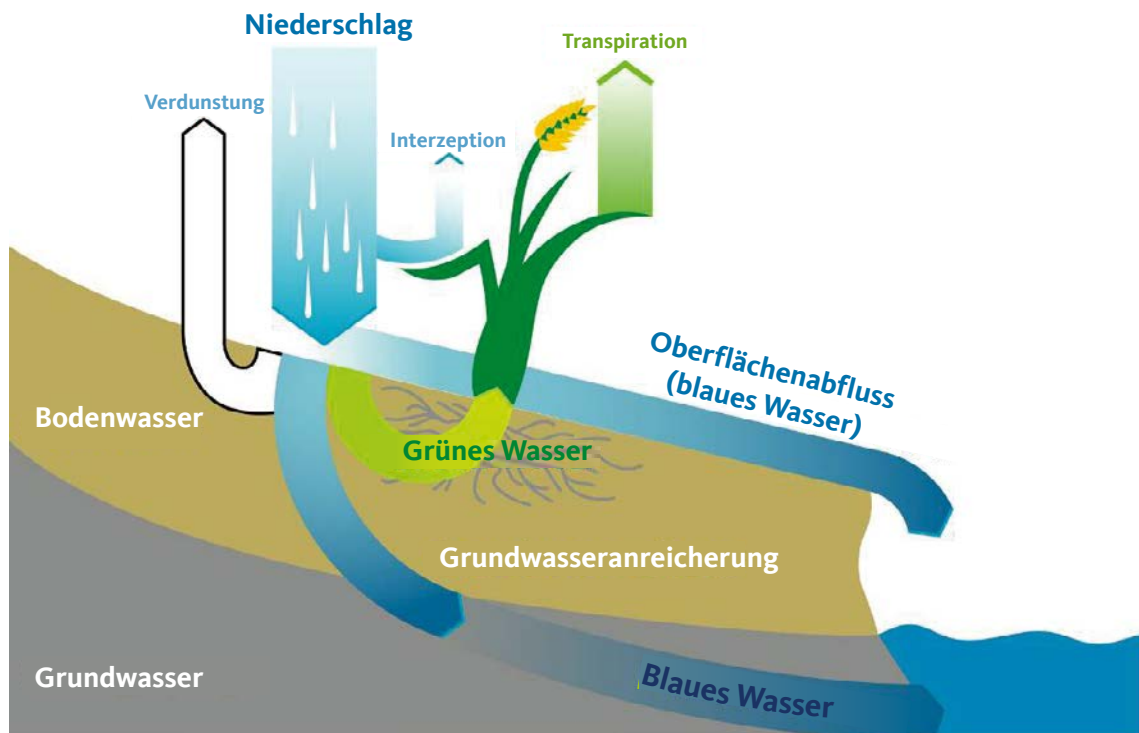


Abbildung 2.2-2

Aufteilung von Niederschlag in grünes und blaues Wasser. Ein Teil des Niederschlags wird im Boden aufgenommen und steht anschließend Pflanzen zur Verfügung (grünes Wasser). Pflanzen geben aufgenommenes Wasser durch Transpiration an die Atmosphäre ab. Ein anderer Teil des Niederschlags verdunstet ungenutzt aus dem Boden oder von der Oberfläche der Pflanzen (Interzeption). Schließlich fließt auch Wasser an der Oberfläche oder ins Grundwasser ab (blaues Wasser).

Quelle: verändert nach Geertsma et al., 2009

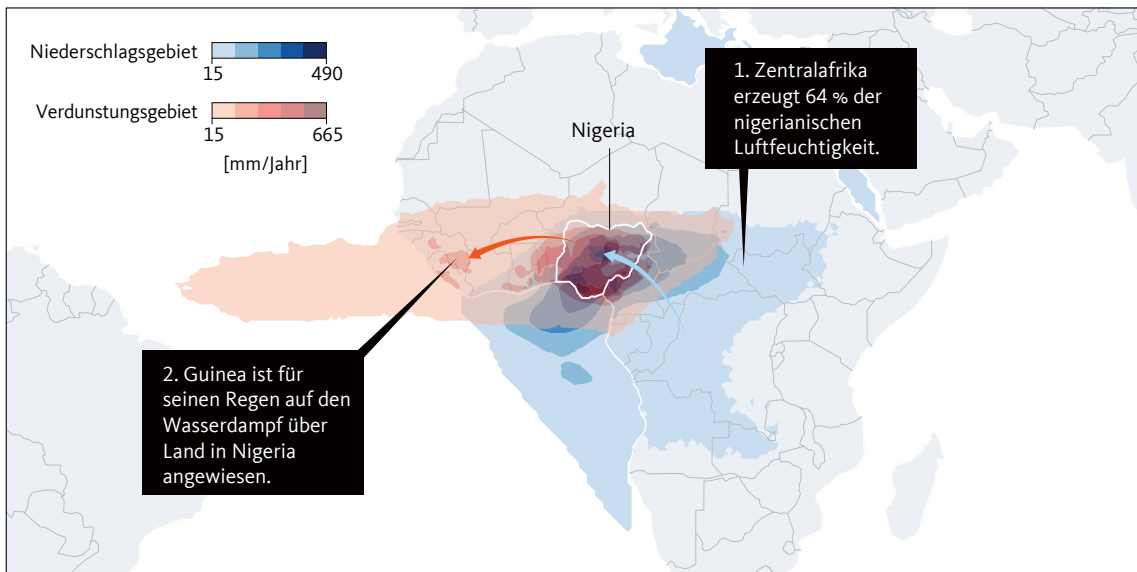


Abbildung 2.2-3

Nigeria als produzierendes und empfangendes Gebiet von Feuchtigkeit und Verdunstung. Nigeria erhält 64 % seiner Feuchtigkeit für Niederschläge aus kontinentalen Gebieten. Dabei stammen 42 % aus anderen Ländern, hauptsächlich aus dem Kongobecken. Gleichzeitig generiert Nigeria 43 % der Feuchtigkeit, die zu Regenfällen in seinen Nachbarländern führt (Kamerun, Guinea und Ghana). Dieses Beispiel zeigt die Vulnerabilität all dieser Länder auf, da sich die Abholzung des Kongobeckens sehr wahrscheinlich auf die Menge der Regenfälle auswirken würde.

Quelle: Rockström et al., 2023b

der Kohlenstofffixierung in Böden und Wäldern sowie anderer Ökosystemleistungen, sondern auch für die Gewährleistung etablierter Wassernutzungen in verschiedenen Sektoren (GCEW, 2023a; Rockström et al., 2024). Eine bedarfsdeckende Verteilung des Wassers zwischen Naturräumen und intensiv vom Menschen genutzten Räumen trägt somit zur Erhaltung allen Lebens bei und sichert auch die Wasser- und Nahrungsmittelversorgung der Menschheit.

Die Notwendigkeit einer umfassenden Sicht auf die Wasserressourcen, die auch das bodengebundene Wasser umfasst, zeigt sich auch in der überregionalen Bedeutung der Wasseraustauschs zwischen Land und Atmosphäre. Bis zu 50 % des Niederschlags über Land stammt aus Evapotranspiration von Landflächen, der Rest aus Verdunstung aus den Ozeanen. In vielen Ländern hängt der Niederschlag daher auch von Verdunstung in Gebieten außerhalb ihrer eigenen territorialen Grenzen ab (Rockström et al., 2023b). Länder, die überwiegend Luftmassen aus Richtung des Ozeans erhalten, sind hinsichtlich ihrer Niederschläge wenig abhängig von Wassertransporten aus umgebenden Ländern. Landumschlossene Länder und jene, die überwiegend Luftmassen von Land erhalten, sind stärker von Landnutzungen in Nachbarländern betroffen, die den Wasserkreislauf verändern. Beispielsweise wird durch die Abholzung von Wäldern im Kongobecken die Niederschlagsmenge der Nachbarländer beeinflusst

(Abb. 2.2-3). Starke Bewässerung von Feldfrüchten in Indien führt zu erhöhtem atmosphärischem Feuchtigkeitstransportiert und beeinflusst damit den Abfluss des Jangtse-Flusses in China. Selbst ein großes Land wie Russland, dessen Feuchtigkeit zu 45 % intern „recycled“ wird, erhält 20 % seiner Feuchtigkeit aus Nachbarstaaten (Rockström et al., 2023b). Auch durch diese Abhängigkeiten ist internationale Kooperation im Wasserbereich wichtig (Rockström et al., 2023b: 796).

2.2.2

Beobachtbare Auswirkungen des Klimawandels

Durch den Klimawandel wird der globale Wasserkreislauf intensiviert. Wasser und Klima sind durch Wasser- und Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und der Landoberfläche untrennbar miteinander verbunden (Kundzewicz, 2008). Eine wärmere Atmosphäre kann pro 1 °C Erwärmung 7 % mehr Wasser in gasförmigem Zustand aufnehmen. Dadurch sind mehr und stärkere Niederschläge möglich (Douvill et al., 2021). Bereits heute ist die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge in vielen Regionen weltweit erhöht, insbesondere in den nördlichen hohen Breitengraden (Caretta et al., 2022). Eine Abnahme der Durchschnittsmenge wurde dagegen in den Tropen beobachtet (Caretta et al., 2022),

trockenere Sommer wurden aber auch in der Mittelmeerregion, im Südwesten Australiens und Südamerikas, in Südafrika und im westlichen Nordamerika beobachtet (Douville et al., 2021).

Die globale Erwärmung führt auch zu einer erhöhten Evapotranspiration (Summe aus Transpiration und Evaporation, d. h. die Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen). Zusammen mit der erhöhten atmosphärischen Wasseraufnahme und zunehmend variablen Niederschlagsmustern reduziert dies in vielen Regionen die Feuchtigkeit nahe der Erdoberfläche und trägt somit zu regionalen Trockenereignissen bei (Douville et al., 2021; Caretta et al., 2022). Die globale Bodenfeuchte ist bereits leicht gesunken, insbesondere in der Mittelmeerregion aber auch in Teilen Nordamerikas und Australiens, was sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität von Trockenereignissen in den letzten Dekaden erhöht hat (Douville et al., 2021). Die veränderten Niederschlagsmuster sowie die bereits veränderten Abflüsse aus Schneeschmelze und Gletschern verändern auch die Wassermenge in den Fließgewässern. Es kommt zu Hoch- bzw. Niedrigwasser und auch die saisonalen Wassermengen verändern sich, was zu einer zunehmenden Unregelmäßigkeit der Abflüsse führt (BAFU, 2012). Die zunehmend schwankenden natürlichen Abflüsse treffen auf eine Wasserinfrastruktur, die mit diesen Veränderungen immer schlechter umgehen kann.

Hinzu kommen lokale Veränderungen des Permafrosts, besonders in Regionen mit dünnem und diskontinuierlichem Permafrost, z. B. in Südsibirien, Südzentralalaska, Nordostchina, oder aber in der Nähe der südlichen Grenze des Permafrosts (Jin et al., 2022). In allen Permafrostgebieten konnte in den letzten Jahrzehnten ein Anstieg der Permafrosttemperatur verzeichnet werden, was zunehmend zum Auftauen bzw. zur Vertiefung der aktiven, nicht gefrorenen Schicht führt (Fox-Kemper et al., 2021). Dies führt nicht nur zu erhöhten Grundwasserströmen, sondern verändert auch die Grundwasseranreicherung (räumlich und zeitlich) sowie den Abfluss, mit Auswirkungen auf die Grundwasserbilanz sowie auf die Oberflächengewässer (Jin et al., 2022). Die Degradation von Permafrost ist zudem eine potenzielle weitere Quelle für die Freisetzung von Stoffen und führt zu Veränderungen der Landschaft, durch Erosion (Lafrenière und Lamoureux, 2019; Langer et al., 2023).

Global betrachtet sind auch Extremereignisse wie lange Hitzewellen, Dürren oder Starkregen häufiger und heftiger geworden (IPCC, 2019b, 2021c), sie treten zudem schneller und auf kürzeren Zeitskalen auf (flash droughts, flash floods; Yuan et al., 2023; Yin et al., 2023). Die Zunahme landwirtschaftlicher, aber auch hydrologischer und ökologischer Dürren weltweit (IPCC, 2021c; Yuan et al., 2023) trifft insbesondere Gebiete, die ohnehin

schon unter Niederschlagsmangel leiden (UNESCO, 2020).

Generell haben Dürren erhebliche Auswirkungen auf das Wachstum der Vegetation und damit auf Landwirtschaft und Ökosysteme (Yuan et al., 2023). Sie können außerdem kombinierte Ereignisse (compound events) mit kaskadenartigen Auswirkungen für Mensch und Natur auslösen, z. B. das erhöhte Risiko von Waldbränden, die Erschöpfung von Wasserressourcen, die Verschlechterung der Luftqualität oder eine Bedrohung der Ernährungssicherheit (Christian et al., 2021; IPCC, 2022b). So nimmt beispielsweise seit etwa zehn Jahren die Anzahl und Größe der Waldbrände kontinuierlich zu (San-Miguel-Ayaz et al., 2022). Dies betrifft insbesondere Australien, die USA und Südamerika (Nolan et al., 2022), aber auch Südeuropa: In den Jahren 2007–2016 zerstörten Waldbrände in Portugal, Spanien, Frankreich, Italien und Griechenland im Durchschnitt insgesamt 457.000 ha pro Jahr, das entspricht fast der doppelten Fläche des Saarlands (Dupuy et al., 2020). In Deutschland gab es 2021 eine „Erholungspause“, bevor 2022 die Brände umso heftiger wüteten (BMEL, 2023).

Auch Überschwemmungsereignisse werden intensiver. Flussüberschwemmungen haben im 20. Jahrhundert bereits über 7 Mio. Todesopfer gefordert (Merz et al., 2021) und gegenwärtig sind weltweit etwa 58 Mio. Menschen pro Jahr von Flussüberschwemmungen betroffen, davon mehr als die Hälfte in Asien (Dottori et al., 2018). Durch die global bereits erhöhte Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, insbesondere in Nordamerika, Europa und Asien (Seneviratne et al., 2021; Caretta et al., 2022), steigt auch die Gefahr von Sturzfluten. Dies gilt insbesondere in den Trockengebieten der Welt, auch in Afrika (Abb. 2.2–4; Kap. 4.3; Yin et al., 2023). Weltweit war die Zahl der Sturzfluten in Trockengebieten in den Jahren 2000–2022 bereits 20-mal höher als im vergangenen Jahrhundert (1900–1999; Yin et al., 2023). Sturzfluten können überall auftreten. Vulnerabel sind Gebiete mit schlechten oder unzureichenden natürlichen und künstlichen Abflusskapazitäten.

An Küsten treten zusätzlich vermehrt Sturmfluten auf, die bedingt durch den Meeresspiegelanstieg und die zunehmende Intensität von Stürmen immer höher auflaufen. Zwischen 1901–2018 ist der Meeresspiegel um etwa 20 cm angestiegen (IPCC, 2023a). Insbesondere niedrig liegende Küsten und Inseln sind bereits von häufigeren Sturmfluten mit historisch ungewöhnlich starken Überflutungen betroffen (IPCC, 2019a).

Die derzeitige Erwärmung der weltweiten Süßgewässer folgt nahezu der Erwärmung der Atmosphäre (Grant et al., 2021). Der für Süßwasserorganismen verfügbare Lebensraum schrumpft (Kraemer et al., 2021). Die Erwärmung führt zu einer stabileren Schichtung des Wassers und reduziert die vertikale Durchmischung der Wassersäule. Im Zusammenspiel mit der erhöhten

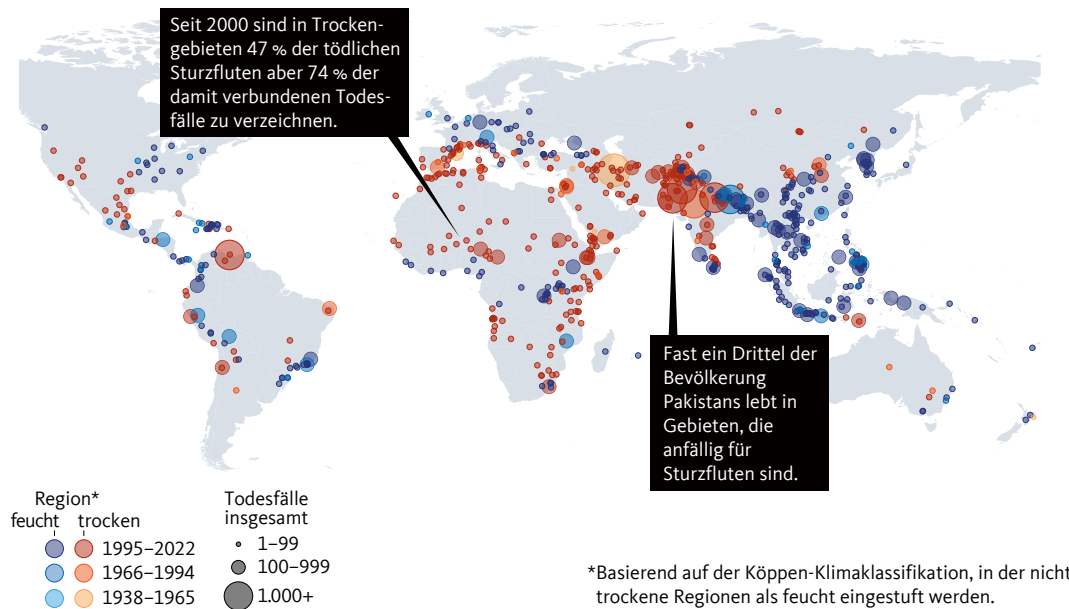


Abbildung 2.2-4

Globaler Überblick über das Auftreten von Sturzfluten. Generell scheinen Sturzfluten in trockenen Regionen (dunkelrot: Zeitraum 1995–2022, hellrot: 1966–1994 und orange: 1938–1965) im Vergleich zu feuchteren Regionen (dunkelblau: Zeitraum 1995–2022, blau: 1966–1994 und hellblau: 1938–1965) mehr Todesfälle zu verursachen, da trockene Böden weniger Wasser aufnehmen können und die dort lebenden Menschen häufig weniger darauf vorbereitet sind. Die Größe der Kreise steht hierbei für die Anzahl der Todesfälle.

Quelle: Yin et al., 2023

Wassertemperatur verursacht dies einen Rückgang des gelösten Sauerstoffs (Parmesan et al., 2022). Der Sauerstoffgehalt in den Süßwasserseen nimmt daher rapide ab – um ein Vielfaches schneller als in den Ozeanen. So sank z. B. in den letzten vier Jahrzehnten der Sauerstoffgehalt im tiefen Wasser von Seen der gemäßigten Breiten um rund 18 % (Jane et al., 2021). Auch die Wasserqualität wird durch den Einfluss der erhöhten Wassertemperaturen auf biogeochemische Prozesse negativ beeinflusst (Capon et al., 2021) und die Versalzung des Süßwassers stellt ebenfalls eine Bedrohung für Vegetation, Tierwelt bzw. ganze Süßwasserökosysteme dar (Kaushal et al., 2021). Bei Versalzung wird Genießbarkeit bzw. Verträglichkeit durch erhöhte Konzentrationen von Mineralien, vor allem von Natrium- und Chloridionen eingeschränkt. Eine Versalzung von terrestrischen und Süßwasserökosystemen bedroht daher deren Organismen und ihre Funktionalität. Versalzung bedroht zudem die Trinkwasserversorgung des Menschen sowie auch die Ernährungssicherheit von Menschen und Tieren, wenn Nahrungspflanzen und -tiere intolerant gegenüber erhöhter Salinität sind (Kaushal et al., 2023).

Auch Wasserspiegel und -mengen in Flüssen und Seen verändern sich bereits, und weltweit ist die Fläche von Feuchtgebieten bereits gesunken. Durch direkte menschliche Einflüsse (z. B. Landnutzungsänderungen), aber zunehmend auch durch den Klimawandel waren im Jahr 2000 beispielsweise nur noch 13 % der um das Jahr 1700 existierenden Feuchtgebiete vorhanden; in jüngster Zeit waren die Verluste sogar noch deutlicher (ca. 0,8–1,2 % pro Jahr von 1970–2008; IPBES, 2019a). Auch fallen auf allen Kontinenten und in allen klimatischen Zonen 51–60 % der Fließgewässerstrecken regelmäßig und zumindest kurzfristig trocken, nicht mehrjährige Flüsse und Bäche sind eher die Regel als die Ausnahme (Messenger et al., 2021). Jedoch sind auch viele der ehemals mehrjährigen Flüsse und Bäche (z. B. Nil, Colorado) auf Grund von Landnutzungsänderungen, Wasserentnahmen und dem Klimawandel mittlerweile intermittierend geworden und es wird erwartet, dass immer größere Teile des globalen Flussnetzes in den kommenden Jahren zumindest saisonal nicht mehr fließen werden (Messenger et al., 2021). Auch hier schwinden zunehmend Lebensräume; davon ist nicht nur die Natur, sondern auch ein großer Teil der Weltbevölkerung zunehmend betroffen (Caretta et al., 2022).

Die Auswirkungen des Klimawandels, im Zusammenspiel mit den Habitatverlusten, den Veränderungen im globalen Wasserkreislauf und der Verschmutzung beeinflussen die Funktionalität der Süßwasserökosysteme und deren Flora und Fauna bereits nachhaltig (Capon et al., 2021). Die veränderten saisonalen Wassertemperaturen in Seen und Flüssen führen z. B. bereits zu einer Verschiebung der Verbreitungsgebiete von Süßwasserarten und Beeinträchtigung bisheriger Ökosystemfunktionalitäten (Caretta et al., 2022; Parmesan et al., 2022). Kaltwasserfischarten gehen verloren, während warmtolerante Zooplanktonarten sowie warmtolerante Fischarten, Wirbellose und Wasserpflanzen sich ausbreiten (Parmesan et al., 2022). Bereits etwa 81 % der Populationen von Süßwasserarten sind rückläufig bzw. vom Aussterben bedroht (Parmesan et al., 2022), hauptsächlich bedingt durch den zunehmenden Verlust von Lebensräumen und die Ausbreitung invasiver Arten und Verschmutzung, durch Extremereignisse wie Hitzewellen, aber auch durch den Verlust von Gletschern (Parmesan et al., 2022). In West- und Mitteleuropa und den westlichen Teilen Osteuropas sind beispielsweise derzeit mindestens 37 % der Süßwasserfische und etwa 23 % der Amphibien vom Aussterben bedroht (IPBES, 2018b; Kap. 3.4.5, 3.4.6.2, 3.4.8).

Die biologische Vielfalt der Süßgewässer ist besonders empfindlich gegenüber dem Klimawandel, der hier im Vergleich zu marinen Lebensräumen besonders starke Auswirkungen hat. In Binnengewässern und Süßwasserökosystemen ist der Verlust der biologischen Vielfalt in den letzten Jahrzehnten aufgrund der geringeren Wasservolumina und kleineren Habitate, der geographischen Fragmentierung und der größeren Nähe zur menschlichen Zivilisation bereits weitaus stärker fortgeschritten als in terrestrischen oder marinen Ökosystemen (Tickner et al., 2020; Capon et al., 2021; Albert et al., 2021; Costello et al., 2022), und viele Leistungen der Süßwasserökosysteme (Tab. 2.1-1; Kap. 2.1) sind bereits heute stark eingeschränkt (Parmesan et al., 2022).

2.2.3

Bedeutung von Landnutzung und Klimawandel für grünes Wasser

Mehr als 75 % der Landoberfläche der Erde wurden durch den Menschen verändert (Kaushal et al., 2017). Die weltweit vorherrschende Landnutzungsart auf fast 50 % der kultivierbaren Fläche ist die Landwirtschaft (Schürings et al., 2022). Landnutzungsänderungen, z. B. die Umwandlung von Feldern in städtische Siedlungsflächen, die steigende Bodenverdichtung intensiv genutzter landwirtschaftlicher Flächen, oder die Abholzung von Wäldern und eine fehlende Vegetationsdecke ändern die

Abflussregime und haben damit direkte Auswirkungen auf den Wasserkreislauf (IPCC, 2021c; WBGU, 2020). Wie Wasser in den Boden aufgenommen wird, wie schnell es über Flächen, Bäche und Flüsse abfließt, in welchem Ausmaß die Landoberfläche überflutet wird oder wie stark die Verdunstung ist hängt unter anderem von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Eine zunehmende Flächenversiegelung erhöht die Gefahr von zu schnellen und erhöhten Abflüssen mit der Konsequenz extremer Überschwemmungen (Caretta et al., 2022). Bodenerosion, Nährstoffverarmung und andere Formen der Bodendegradation (vor allem durch die Landwirtschaft) beeinträchtigen die Verfügbarkeit, Qualität und Speicherung von Wasser auch weit über die jeweilige Region hinaus (IPBES, 2018a; IPCC, 2019b). Zudem verläuft etwa ein Drittel der globalen Fließgewässer durch landwirtschaftlich, industriell oder städtisch geprägte Regionen mit erheblichen Belastungen der Wasserqualität (Kap. 3.1.3) und negativen Effekten auf die Gesundheit von Süßwasserarten und -ökosystemen (Albert et al., 2021).

Langanhaltende Trockenperioden und Dürrejahre über mehrere Jahre verändern die Bodenfeuchtigkeit erheblich und hängen unmittelbar mit Landnutzungs- und Klimaänderungen zusammen (Haerdle, 2018; Samaniego et al., 2018). Verringerte Bodenfeuchte, verstärkt durch Bodendegradation, führt nicht nur unmittelbar zu Ertrags-einbußen bei der Vegetation, sondern verhindert auch die Infiltration von Niederschlägen für die Grundwasserneubildung. Anhaltende Hitzewellen und Dürren, wie sie in Europa in den Jahren 2018–2023 auftraten, führten zu erhöhten Verdunstungen, einem anhaltenden Rückgang der Bodenfeuchte auch in tieferen Bodenschichten und deutlich reduzierten Abflüssen in vielen Fließgewässern (WMO, 2023). Dies führte zu Trockenstressschäden in der Vegetation und aquatischen Ökosystemen, deutlichen Ertragseinbußen in der Landwirtschaft, aber auch zu Einschränkungen in der Schifffahrt sowie zur Abschaltung von Kraftwerken aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Kühlwasser (Kasten 7.4-1).

2.2.4

Übernutzung von blauem Wasser

Die Veränderungen der Wasserverfügbarkeit treffen auf oftmals nicht nachhaltige Wassernutzungen (Kap. 2.2.4.1). Mit der Meerwasserentsalzung gibt es bereits Ansätze zur Ausweitung des Dargebots (Kap. 2.2.4.2), die allerdings, wie auch weitere technologische Ansätze (Kap. 2.2.4.3), mit unerwünschten Nebeneffekten und Risiken verbunden sind.

2.2.4.1

Trends der Wassernutzung

Die globalen Wasserentnahmen sind zwischen 1900 und 2010 um 700 % gestiegen (Wada et al., 2016). Besonders die Bewässerung zur Nahrungsmittelproduktion hat hierzu beigetragen, aber auch der Wasserkonsum von Industrie und Haushalten nahm seit Beginn des 20. Jahrhunderts stark zu, insbesondere zwischen 1950 und ca. 1990 (FAO, 2022b), obwohl es Effizienzsteigerungen in der Bewässerung und Innovationen in der Wasseraufbereitung und dem Betrieb von Wasserverteilungsinfrastrukturen gab.

Global entfallen 72 % aller Süßwasserentnahmen auf die Landwirtschaft, 15 % auf die Industrie (Bergbau und Gewinnung von Rohstoffen, verarbeitendes Gewerbe, Strom-, Gas-, Dampf- und Klimaanlagenversorgung sowie das Baugewerbe) und 13 % auf die Kommunen und Haushalte (AQUASTAT, 2024). Die Landwirtschaft ist somit weltweit der größte Verbraucher von Süßwasser. Der Anteil der Wasserentnahmen für die Landwirtschaft an den Gesamtwasserentnahmen variiert jedoch je nach Region und Einkommensniveau erheblich. In Hoheinkommensländern sind es im Durchschnitt nur 41 % der gesamten Entnahmen, in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen dagegen zwischen 80 und 90 % (Ritchie und Roser, 2017). Der Anteil der landwirtschaftlichen Wasserentnahmen an den gesamten Entnahmen betrug in Deutschland im Jahr 2019 etwa 2,2 %, da die Landwirtschaft bisher überwiegend mit Regenwasser auskam (UBA, 2022a). Allerdings sind Daten zu landwirtschaftlichen Entnahmen mit hoher Unsicherheit behaftet. Zudem zeigte sich auch in Deutschland besonders in den letzten Jahren mit anhaltenden Trockenphasen regional ein steigender Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft (HBS, 2023). Globale und regionale Durchschnittswerte verschleiern insofern regionale und lokale Unterschiede (UNESCO, 2023). Laut FAO machen bewässerte Anbauflächen nur etwa 20 % der Gesamtfläche aus, doch entfallen auf sie mehr als 40 % des Wertes der gesamten Erzeugnisse. In manchen Regionen tragen bewässerte Flächen sogar mehr als 50 % des Wertes der landwirtschaftlichen Produktion bei (FAO, 2020b: 58).

Für die Sicherung des Wasserdargebots besonders problematisch ist der Trend, verstärkt Grundwasser zu entnehmen, um die Bewässerung in der Landwirtschaft in semiaride Gebieten auszuweiten (Bierkens und Wada, 2019; Llamas und Martínez-Santos, 2005; Wada et al., 2010; Siebert et al., 2010; Marston et al., 2015). Auch wird für urbane Räume, insbesondere Megastädte, Grundwasser mit steigenden Raten entnommen, um die wachsende Stadtbevölkerung ohne Zugang zu sauberem Oberflächenwasser oder leitungsgebundenem Trinkwasser zu versorgen (Bierkens und Wada, 2019). Die zunehmenden Grundwasserentnahmen für Bewässerung

und städtische Trinkwasserversorgung haben dazu geführt, dass vermehrt nicht erneuerbares Grundwasser (Tiefengrundwasser) genutzt wird. Die Folge ist eine zunehmende Absenkung des Grundwasserspiegels (Herbert und Döll, 2019), die insbesondere in Ländern der MENA-Region und Südeuropas und in bedeutenden Grundwasserleitern in Indien, Nordchina, dem mittleren Osten, Nordafrika und dem Südwesten der USA zu beobachten war (Herbert und Döll, 2019; de Graaf et al., 2017; Wada et al., 2012; Caretta et al., 2022; Bierkens und Wada, 2019). In den meisten der zuvor genannten Regionen machte der Wasserverbrauch für Bewässerung zwischen 1960 und 2010 durchschnittlich über 90 % des gesamten Wasserkonsums aus und etwa die Hälfte davon stammte aus nicht erneuerbarem Grundwasser (Wada und Bierkens, 2014).

Analysen lokaler Messdaten von Grundwasserentnahmestellen deuten darauf hin, dass das lokale Management von Grundwasserressourcen eine Rolle dabei spielen kann, das Absinken von Grundwasserspiegeln zu verlangsamen oder sogar umzukehren (Jasechko et al., 2024; Chávez García Silva et al., 2024). Beispiele für erfolgreiches Grundwassermanagement finden sich im La-Mancha-Oriental-Grundwasserleiter in Südspanien (Chávez García Silva et al., 2024), in der östlichen Saq-Aquifere in Saudi-Arabien oder auch im Becken von Bangkok (Jasechko et al., 2024). Allerdings stiegen die Grundwasserspiegel zu Beginn des 21. Jahrhunderts nur in 6 % der von Jasechko et al. (2024) betrachteten Aquifere (mit mehr als 0,1 m pro Jahr). Auch erholen sich Grundwasserspiegel oft relativ langsam. Dagegen zeigten 36 % der betrachteten Aquifere fallende Grundwasserspiegel (mit mehr als 0,1 m pro Jahr). In 30 % der Grundwasserleiter, für die ein Vergleich mit den Jahren 1980–2000 möglich war, beschleunigte sich das Absinken der Grundwasserspiegel im Zeitraum 2000–2022. Insbesondere in agrarisch genutzten trockenen Regionen sind bestehende Managementpraktiken Jasechko et al. (2024) zufolge konzeptionell oder in der Umsetzung oft nicht ausreichend, um ein Absinken von Grundwasserspiegeln zu verlangsamen oder umzukehren.

2.2.4.2

Meerwasserentsalzung

Süßwasser und damit neues blaues Wasser lässt sich auch aus Meerwasser oder Brackwasser mit Hilfe energieintensiver technologischer Behandlungsverfahren wie der Meerwasserentsalzung durch Hochdruckmembranverfahren (Umkehrosmose) oder thermische Destillations- und Verdampfungsverfahren gewinnen, besonders in Küstenregionen oder für Inselstaaten. In den vergangenen 20–30 Jahren sind Entsalzungsanlagen zu einer wichtigen alternativen Süßwasserquelle für Länder im Nahen Osten (z. B. Saudi-Arabien, Israel, Vereinigte Arabische

Emirate, Katar), für Australien, Spanien, Südafrika, die USA und zunehmend auch Indien und China geworden (Eyl-Mazzega und Cassignol, 2022). Die kumulierte Behandlungskapazität bestehender Entsalzungsanlagen weltweit lag 2022 bei ca. 99 Mio. m³ Süßwasser pro Tag – ausreichend für die Wasserversorgung von ca. 800 Mio. Menschen (EU Blue Economy Observatory, 2024). Der weitere Ausbau von Meerwasserentsalzungsanlagen ist jedoch durch den hohen Energiebedarf sowie nachteilige ökologische Auswirkungen gehemmt. Während die Aufbereitung herkömmlicher Süßwasserressourcen einen Energiebedarf unter 1 kWh pro m³ hat, liegt dieser bei der Meerwasserentsalzung mit Umkehrosmoseanlagen bei ca. 3 kWh pro m³ (Drewes und Horstmeier, 2016). Für thermische Verfahren sind sogar bis zu 10 kWh/m³ erforderlich. Daher ist auch für diesen Sektor der verstärkte Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien von großer Bedeutung (Bundschuh et al., 2021).

Bei der Entnahme des Meerwassers entstehen außerdem deutliche Belastungen für die aquatische Umwelt (z. B. Absterben von Larven, Jungfischen), ebenso bei der Rückführung von konzentrierten Salzlösungen (durch die großen Dichteunterschiede). Auch muss das produzierte Wasser aufgrund der erzielten Vollentsalzung chemisch nachbehandelt werden, um es für den menschlichen Gebrauch genießbar zu machen. Trotz dieser Maßnahmen deuten einige Langzeitstudien auf nachteilige gesundheitliche Effekte hin, die zu einem nachweislich höheren Risiko von Herzkrankheitsgefahren führen können (Shlezinger et al., 2018).

2.3

Wirtschaftliche und soziale Aspekte der Wassernutzung

2.3.1

Virtuelles Wasser

Die Wassermengen, die bei der Herstellung von Gütern oder Dienstleistungen verbraucht oder verschmutzt werden, werden auch als virtueller Wassergehalt von Gütern und Dienstleistungen bezeichnet. Der Wasserfußabdruck eines Landes erfasst den virtuellen Wassergehalt der im Land konsumierten Güter und Dienstleistungen (also die Summe aus dem direkten und indirekten Wasserverbrauch im Inland und für die Produktion von Importen, abzüglich des virtuellen Wassergehalts der Exporte; Hoekstra und Hung, 2002). In vielen Regionen und Ländern stammt ein großer Teil des Wasserfußabdrucks aus Produkten, die außerhalb der Region bzw. des Landes produziert und importiert werden (Hoekstra und Hung, 2002; Hoekstra

et al., 2011). Für in Deutschland konsumierte Produkte und Dienstleistungen beträgt dieser Anteil ca. 86 % (UBA, 2022b). Die Wassermengen, die bei der Herstellung von gehandelten Gütern und Dienstleistungen verbraucht oder verschmutzt werden, lassen sich als virtuelle Wasserströme über den Globus verfolgen (Allan, 1998). Abbildung 2.3-1 veranschaulicht die Komplexität solcher Ströme exemplarisch für Blauwassermengen, welche mit dem Handel mit Nahrungsmitteln assoziiert werden können. Unternehmen sind über internationale Lieferketten mit Wasserverbräuchen im Ausland verbunden. Konsum- und Unternehmensentscheidungen haben auf diese Weise grundsätzlich Auswirkungen, z. B. auf die Verfügbarkeit und Qualität von Wasserressourcen und die Ernährungssicherheit in Export- und Importländern, und können auch umgekehrt, z. B. von sich ändernden Wasserverfügbarkeiten im Ausland, betroffen sein. Ob diese Auswirkungen und Abhängigkeiten kritisch sind, hängt von der Situation in den jeweiligen Ländern ab.

Mit der Produktion der gehandelten Güter möglicherweise verbundene negative sozioökonomische und Umweltwirkungen – sowohl durch die nötigen Wassermengen bzw. eine Übernutzung von Wasserressourcen als auch durch Verschmutzung, z. B. durch Chemikalien in Industrie und Pestizide in der Landwirtschaft – treten im exportierenden Land auf und werden vom importierenden Land insofern externalisiert. In Form von virtuellem Wasser „gehandelte“ (oder in Produkten „enthaltene“) Verschmutzung und deren Wirkungen werden bisher kaum ermittelt, u. a. aufgrund methodischer Herausforderungen (d’Odorico et al., 2019; UBA, 2022b). Die folgenden Abschnitte fokussieren daher auf die mit Handel assoziierten mengenmäßigen Wasserverbräuche bzw. ihre Auswirkungen.

Über 65–90 % der weltweiten Ströme virtuellen Wassers stammen aus dem Handel mit Agrarprodukten, gefolgt mit deutlichem Abstand von der Industrie und Energie (d’Odorico et al., 2019; Hoekstra und Mekonnen, 2012). Dementsprechend sind virtuelle Wasserströme aus dem Handel mit Agrargütern und ihre Auswirkungen in der wissenschaftlichen Literatur besonders gut dokumentiert. Auch die in diesem Kapitel zitierte Literatur betrachtet überwiegend den Handel mit Agrargütern. Zu den Auswirkungen nicht landwirtschaftlicher virtueller Wasserströme (z. B. in Verbindung mit dem Handel von Industrie- und Energieprodukten oder Textilien) auf die Quantität und Qualität von Wasserressourcen besteht Forschungsbedarf. Doch nicht landwirtschaftliche virtuelle Wasserströme sind Studien zufolge nicht zu vernachlässigen. So nahm der gehandelte Wasserfußabdruck von Energieprodukten zwischen 2012 und 2018 um 35 % zu. Im Jahr 2018 machten virtuelle Wasserströme aus Energieprodukten etwa 7–9 % der gesamten globalen virtuellen Wasserströme aus. Den größten Anteil daran

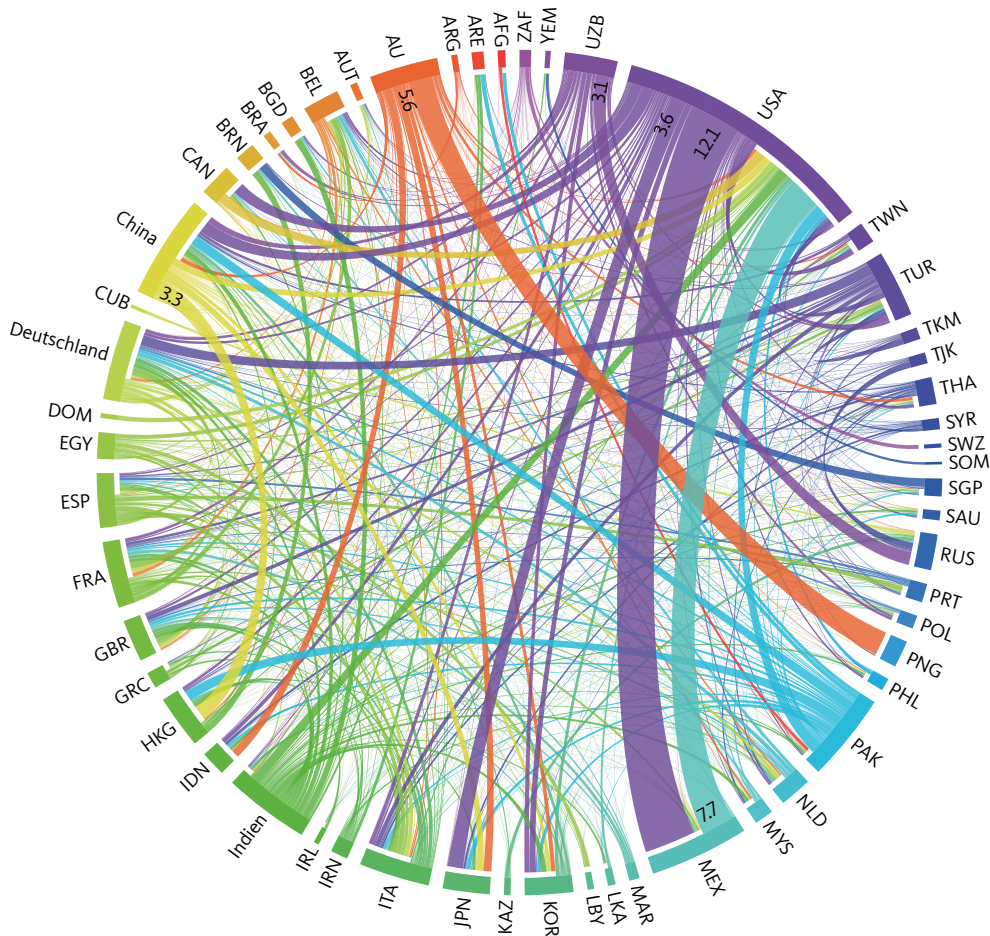


Abbildung 2.3-1

Ströme virtuellen blauen Wassers durch den Handel mit Nahrungsmitteln (1996–2005). Dargestellt sind virtuelle Ströme blauen Wassers zwischen Ländern (in km³ pro Jahr) aus der Periode 1996–2005. Die Farben der Verbindungen kennzeichnen das jeweils exportierende Land. Daten und Länderkürzel finden sich in Tabelle 8a in Scanlon et al., 2023.

Länderkürzel entsprechend ISO 3166 ALPHA-3.

Quelle: Scanlon et al., 2023

haben Feuerholz, Erdöl, Biokraftstoffe und Elektrizität. Feuerholz und Biokraftstoffe sind wasserintensiv produzierte Energieträger, allerdings konzentriert sich der Handel mit ihnen im Allgemeinen auf Industrieländer in Nordamerika und Europa (Peer und Chini, 2020). Der Handel mit Agrarprodukten und seine Auswirkungen betreffen dagegen häufig Niedrigeinkommensländer.

Im Folgenden werden Chancen und Risiken aufgezeigt, die sich aus dem Handel mit virtuellem Wasser für lokale Wasserressourcen in Import- und Exportländern und für die Ernährungssicherheit in Importländern ergeben.

Der virtuelle Wasserhandel bietet wasserarmen Regionen die Möglichkeit, knappe Wasserressourcen zu schonen. Global gesehen kann er zu Wassereinsparungen führen, wenn wasserintensive Produkte aus Regionen importiert werden, in denen Wasser effizienter genutzt wird (Maroufpoor et al., 2021). Einige wissenschaftliche Studien belegen auf globaler Ebene Wassereinsparungen

durch Handel, allerdings in sehr unterschiedlichen Größenordnungen (d’Odorico et al., 2019). Auch für einzelne Länder sind Wassereinsparungen durch Handel, insbesondere infolge der Verbreitung wassersparender Technologien, belegt (d’Odorico et al., 2019; Dang und Konar, 2018).

Es kommt jedoch auch vor, dass gerade wasserarme Regionen Exporteure wasserintensiver Produkte sind (Vallino et al., 2021). So bezieht etwa Deutschland Reis aus Pakistan und Nüsse aus Südeuropa, dem Iran und den USA (Finogenova et al., 2019). Oft sind die Ursprungsländer solcher Produkte Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen, die Importeure Hocheinkommensländer (Vallino et al., 2021). Wassereinsparungen durch den Handel mit virtuellem Wasser sind dementsprechend eher in reichen als in armen Ländern zu erwarten (Distefano und Kelly, 2017).

Durch exportorientierte Produktion in wasserarmen Regionen können die lokalen ökologischen Belastbarkeitsgrenzen (in Anlehnung an planetare Belastbarkeitsgrenzen nach Rockström et al., 2009a; Rockström et al., 2009b) in diesen Regionen überschritten werden. Das Umweltbundesamt (2022b) schätzt, dass dies für fast 10 % der aus dem Ausland stammenden Beiträge zum konsumbezogenen Blauwasserverbrauch Deutschlands der Fall ist. Von besonderer Bedeutung sind hier Spanien und Länder in Südasien, aber auch die USA sowie Länder in Nordafrika und dem Mittleren Osten (UBA, 2022b).

Wasserstress gefährdet in vielen Regionen weltweit die Ernährungssicherheit (Maroufpoor et al., 2021). Der Handel mit virtuellem Wasser kann zur Ernährungssicherung in Regionen beitragen, in denen die Versorgung der Bevölkerung auf Grundlage lokaler landwirtschaftlicher Produktion nur schwer oder gar nicht möglich ist (d'Odorico et al., 2019; Tamea et al., 2016). Gleichzeitig sind Importländer, die sich stark auf globale Handelsverflechtungen verlassen (müssen), anfällig gegenüber lokalen Schocks der Wasserverfügbarkeit oder der Nahrungsmittelproduktion in den Exportländern (d'Odorico et al., 2019). Die Literatur kommt bezüglich des Einflusses von Handel auf die Ernährungssicherung in Importländern zu unterschiedlichen Ergebnissen (Sartori und Schiavo, 2015; Distefano et al., 2018; d'Odorico et al., 2019).

Potenziell vulnerabel sind vor allem wasserarme Länder mit geringer eigener landwirtschaftlicher Produktion und starker Abhängigkeit von Nahrungsmittelimporten, z. B. in der MENA-Region (Tamea et al., 2016). Infolge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine verzeichneten rund 30 Länder, unter anderem Eritrea, Kasachstan und die Mongolei, einen Rückgang der Direktimporte von Getreide um mehr als 50 % (Liu et al., 2023). Im Libanon und in Libyen musste im Jahr 2022 mit einem Netto-defizit der Kalorienzufuhr von 13–28 % gegenüber dem regulären Verbrauch gerechnet werden (Bertassello et al., 2023). Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen mit starker Abhängigkeit von Nahrungsmittelimporten leiden besonders unter einem Rückgang ihrer Importe, was nicht nur an fehlender Kaufkraft, sondern auch an fehlendem Zugang zum Markt oder zu geringer Marktmacht zu liegen scheint (Distefano et al., 2018). Hocheinkommensländer, z. B. in Europa, können gegenüber negativen Import-schocks zwar auch exponiert sein (Tamea et al., 2016), scheinen diese jedoch besser kompensieren zu können.

2.3.2 Wasser, Armut und soziale Ungleichheit

Trotz des Anstiegs des globalen Zugangs zu sauberem Trinkwasser von 62 % der Weltbevölkerung im Jahr 2000 auf 74 % in 2020 bestehen noch große Unterschiede

zwischen Ländern verschiedener Einkommensgruppen (Abb. 2.3-3; UN, 2023b: 12). Etwa 1,3 Mrd. Menschen (19,1 % der Weltbevölkerung), von denen die Hälfte Kinder sind, sind multidimensional arm. Sie leben mit vielfältigen Entbehrungen in Bezug auf Gesundheit, Bildung und materielle Lebensstandards (Stand: 2021; UNDP, 2022; UNDP und OPHI, 2022; Abb. 2.3-2).

Ein erheblicher Teil aller multidimensional armen Menschen (470,1 Mio. Menschen in 111 Ländern) sind unzureichend ernährt und haben keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser, verlässlicher Abwasserentsorgung und Sanitäranlagen. Ihre Anfälligkeit für infektiöse Krankheiten ist hoch (UNDP und OPHI, 2022: 2; Balasubramanian et al., 2023). Hinzu kommt, dass auch in gesellschaftlichen Gruppen mit Zugang zu Trinkwasser, Abwasserentsorgung und Sanitäranlagen dieser Zugang häufig ungleich verteilt ist, oder auch der mangelhafte Zugang je nach Alter oder Geschlecht die Lebenschancen unterschiedlich beeinflusst (Huinink, 2022; Calow und Mason, 2014).

So sind beispielsweise Frauen und Mädchen von einer größeren Last der Wasser- und Sanitärkrise betroffen als Männer und Jungen, da sie oft die Beschaffung von Wasser übernehmen und so weniger Zeit für z. B. Bildung haben und sich dabei physischen Gefahren aussetzen müssen. Bei Kindern wirkt sich der fehlende Zugang zu sauberem Trinkwasser gravierender auf die Entwicklung und den gesundheitlichen Status aus als bei Erwachsenen; bei älteren Menschen wiederum anders und häufig schneller lebensverkürzend als bei jungen Erwachsenen. So zeigt der geschlechtsspezifische Armutsindex „Global Correlation Sensitive Poverty Index“ des German Institute of Development and Sustainability, dass in 95 % aller Länder weibliche Armut im Schnitt doppelt so hoch ist wie männliche. Die größten geschlechtsspezifischen Armutsunterschiede sind im Nahen Osten, in Nordafrika und Südasien zu verzeichnen (Burchi und Malerba, 2023). Diese Weltregionen gehören gleichzeitig auch zu den wasserärmsten Regionen der Erde.

Disparitäten in der Versorgung mit sauberem Trinkwasser bestehen zudem zwischen urbanen und ländlichen Räumen sowie zwischen Gruppen mit hohem und niedrigem Einkommen (UNICEF und WHO, 2023; Abb. 2.3-3). Doch nicht nur einkommensschwache und vulnerable Bevölkerungsgruppen sind beim Zugang zu sauberem Trinkwasser und Sanitärversorgung benachteiligt. Wasserknappheit und zunehmende Extremereignisse behindern auch wirtschaftliches Wachstum und gefährden Entwicklungsziele wie Armutsbekämpfung und Bildung (Kap. 3.2.1.3).

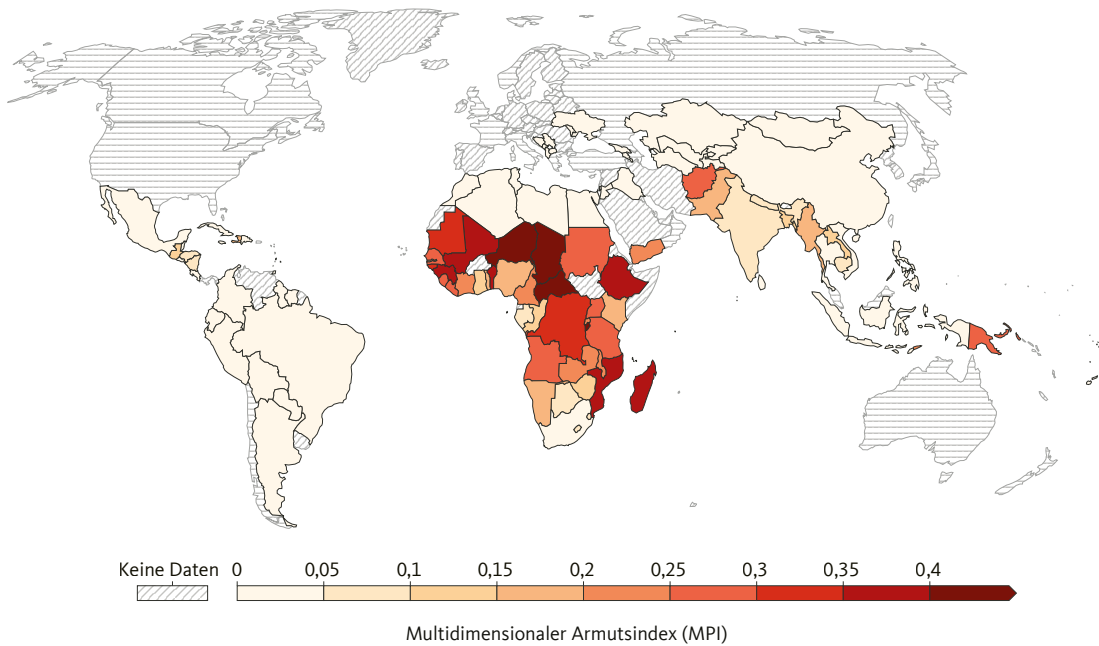


Abbildung 2.3-2

Multidimensionaler Armutsindex, global 2010–2020. Multidimensionale Armut ist definiert als Benachteiligung von Menschen in Bezug auf eine Reihe von Indikatoren für Gesundheit, Bildung und Lebensstandard. Der multidimensionale Armutsindex ist ein Maß für Verbreitung und Ausmaß multidimensionaler Armut.

Quelle: Our World in Data, 2023

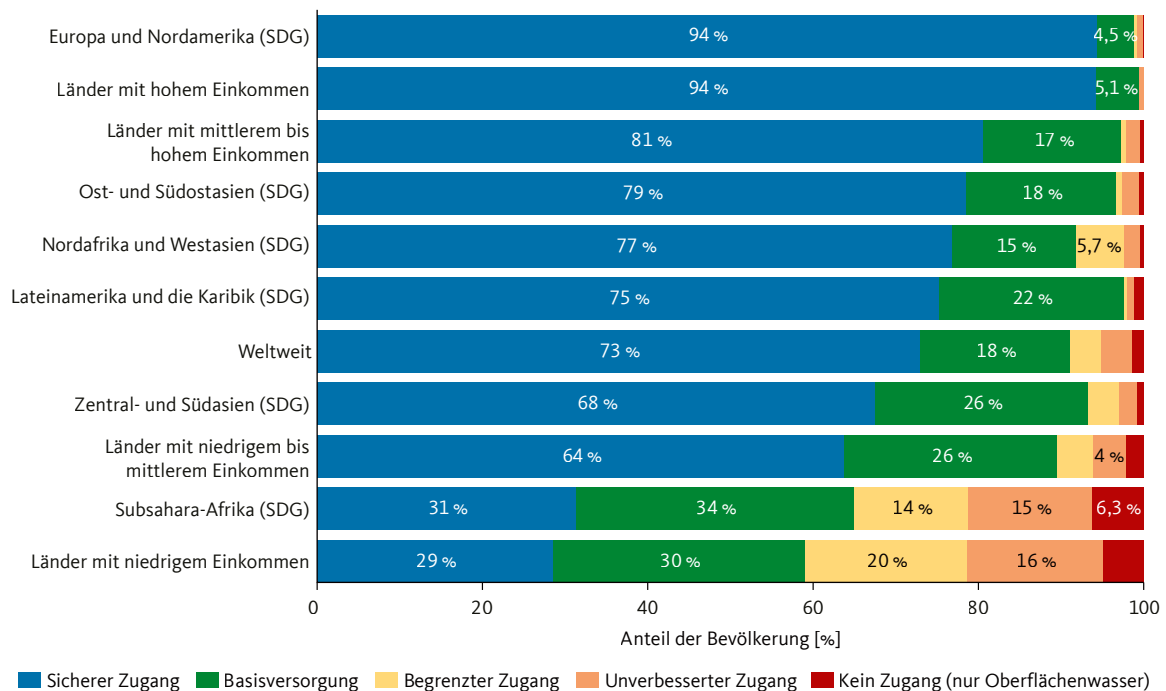


Abbildung 2.3-3

Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu Trinkwasserversorgung nach Region und Einkommensklasse (2022). Gestaffelt nach: kein Zugang (nur Oberflächenwasser), kein verbesserter Zugang, beschränkter Zugang, Zugang zu Basisversorgung und sicherer Zugang zu Trinkwasser.

Quelle: WHO und UNICEF, 2024 – bearbeitet durch Our World in Data

2.3.3

Verschmutzung als Herausforderung für Mensch und Ökosysteme

Heute ist die Wasserqualität von Wasserressourcen, inklusive Grundwasser, durch eine Vielzahl anthropogener Stoffeinträge stark beeinträchtigt (Abb. 2.3-4). Besonders durch Verschmutzung mit langlebigen und gesundheits-schädlichen Schadstoffen kommt es zu dauerhaften Beeinträchtigungen aquatischer Ökosysteme und über das Trinkwasser und die Nahrungskette auch zu Gesundheitsrisiken für Menschen. Für mindestens 3 Mrd. Menschen ist die Wasserqualität wegen mangelnden Monitorings

ungewiss (UN, 2022). Nach Tozer (2023) könnten bis zum Jahr 2100 die Wasserquellen für bis zu 5,5 Mrd. Menschen verunreinigt sein.

2.3.3.1

Pfadabhängigkeiten durch zentrale Wasserinfrastrukturen

Viele Menschen haben bis heute nur einen unzureichenden Zugang zu sicherem Trinkwasser, das frei von Pathogenen und Schadstoffen ist (Abb. 2.3-3). Dies in Kombination mit oder verursacht durch eine fehlende oder ungenügende Abwasserbehandlung beeinträchtigt die Gesundheit der betroffenen Menschen erheblich

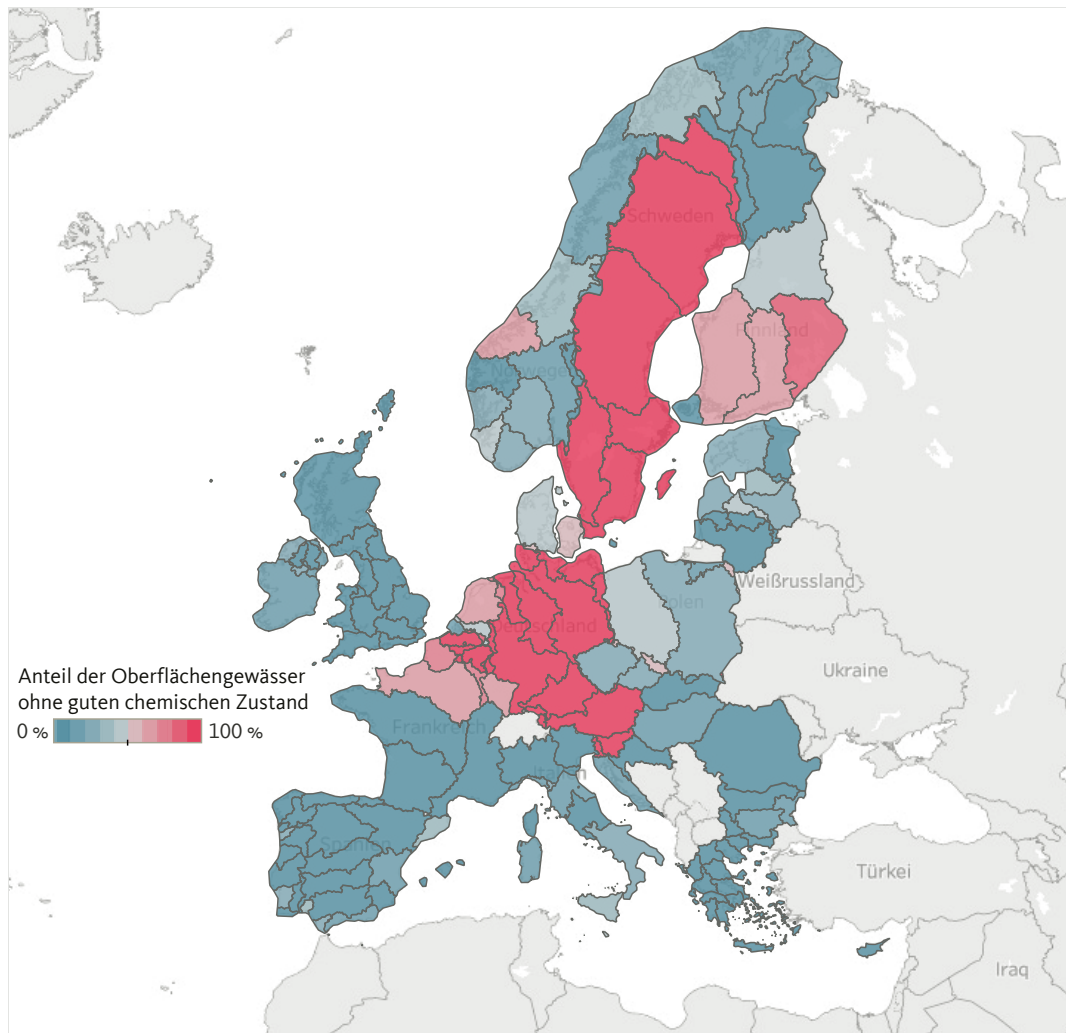


Abbildung 2.3-4

Anteil der Oberflächengewässer in Europa, die keinen guten chemischen Status erreichen. Die Bewertung des chemischen Status schließt ubiquitäre, persistente, bioakkumulative und toxische Stoffe ein.

Quelle: WISE, 2021

(WBGU, 2023). Bereits im Zuge der Industrialisierung Anfang des 19. Jahrhunderts führte die Kontamination von Wasser mit Schadstoffen zu einer massiven Belastung aquatischer Ökosysteme sowie untragbaren hygienischen Verhältnissen und deutlich steigenden Gesundheitslasten in den Städten. Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Verbreitung von Seuchen wie der Cholera und verschmutztem Wasser rückten die zentrale Versorgung von Städten mit sauberem Trinkwasser und die Entsorgung von Abwasser besonders in den Blick der Stadtplaner und Gesundheitsingenieure (Gallardo-Albarrán, 2020). Unter anderem dadurch stieg die Lebenserwartung in England beispielsweise zwischen 1850 und 1950 von 40 auf 70 Jahre, wobei der größte Anstieg zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu verzeichnen war (Haines und Frumkin, 2021). Maßgebend dafür war neben dem Aufbau einer zentralen Trinkwasserversorgung die Einführung der Schwemmkanalisation für die Sammlung und geordnete Ableitung von Abwasser sowie die Abwasserbehandlung in zentralen Kläranlagen. Der Aufbau dieser Strukturen über mehrere Jahrzehnte insbesondere in den Hocheinkommensländern resultierte aufgrund hoher Kapitalintensität und langer Amortisierungsperioden sowie hoher Fixkosten im Betrieb in einer hohen Pfadabhängigkeit der Wasserinfrastruktur. Neben den hohen Investitionskosten erforderte der laufende Unterhalt dieser Infrastruktur auch eine angemessene Planungs- und Betreiberkompetenz, eine Finanzierung durch entsprechende Gebühren sowie effektive Strukturen für den Vollzug, z. B. von Einleitungsverboten, um eine adäquate Wasserqualität zu erreichen. Der Lösungsansatz einer zentralen Wasserver- und -entsorgung wurde zwar auch von Ländern niedrigen und mittleren Einkommens übernommen, resultierte jedoch häufig in einem unvollständigen Ausbau dieser Strukturen mit großen Defiziten im Betrieb, da eine dauerhafte Finanzierung, geschultes Personal oder eine effektive behördliche Überwachung fehlten (Kap. 2.3).

Trotz vorhandener zentraler Abwasserentsorgungsstrukturen ist selbst in Europa der Verschmutzungsgrad großer Teile der Flüsse und Seen hoch – gemessen am guten chemischen Zustand, den die EU-Wasserrahmenrichtlinie vorschreibt. Diese Belastungen liegen vor allem an der Langzeitwirkung von Industriechemikalien wie polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder Tributylzinn und Belastungen aus diffusen Einträgen wie Quecksilber (Abb. 2.3-5; EEA, 2015; Liess et al., 2023). Selbst bei einer geordneten Abwassersammlung und -behandlung können Schadstoffe aus Industrie, Haushalten, Gesundheitseinrichtungen oder Landwirtschaft nur sehr aufwändig aus den Abwässern entfernt werden (civity Management Consultants, 2018; Toshovski et al., 2020; Abb. 2.3-5).

2.3.3.2

Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel

Insbesondere in Hocheinkommensländern sind Stoffeinträge der Landwirtschaft in Grund- und Oberflächengewässer ein ernsthaftes Problem (UNESCO, 2024). Organische Düngemittel können die Gewässer mit Nitraten und pathogenen Mikroorganismen belasten, während synthetische Düngemittel sie mit Nitraten und Phosphaten belasten und zu Eutrophierung führen (Bijay und Craswell, 2021). In Deutschland überschreitet die Nitratbelastung vieler Grundwasserkörper seit Jahren den Grenzwert der Trinkwasserverordnung, teilweise um mehr als 700 %. Die neuesten Zahlen des Nitratberichts 2024 zeigen nur geringe Verbesserungen der Grundwasserqualität (BMEL und BMUV, 2024). Der Grad anthropogener Stickstoffeinleitung in Flussläufe ist in vielen Teilen der Erde auf einem zu hohen Niveau (Mekonnen et al., 2015; Abb. 2.3-6). Die Überdüngung der Gewässer hat weitreichende Folgen für Biodiversität und Gesundheit (Kap. 2.3.4.3).

Die konventionelle Landwirtschaft ist auch der größte Anwender von Pflanzenschutzmitteln und andere Bioziden. Diese können neuronal und hormonell wirken und nehmen Einfluss auf die embryonale Entwicklung (Fukuyama und Tajiki-Nishino, 2020; Gangemi et al., 2016; McKinlay et al., 2008; Syvrud et al., 2021). Auch in der Forstwirtschaft werden Insektizide eingesetzt. In Deutschland sind laut einer Studie des Umweltbundesamts über 80 % der Gewässer in der Agrarlandschaft mit Pflanzenschutzmitteln oberhalb der regulatorisch akzeptablen Konzentrationen belastet und die Artenvielfalt in diesen Gewässern ist damit inakzeptabel bedroht (Liess et al., 2023).

2.3.3.3

Pathogene Mikroorganismen

Die Verbreitung von Mikroorganismen durch verschmutztes Trinkwasser betrifft 2 Mrd. Menschen weltweit. Haupteintragsweg ist die Einleitung ungeklärter, mit Fäkalien belasteter Abwässer in die Gewässer. Insbesondere in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens leiden Kinder unter Unterernährung durch wiederkehrende Diarrhoe, ausgelöst durch pathogene Mikroorganismen im Trinkwasser (Sameh, 2023; WHO, 2023). Pathogene Mikroorganismen und Parasiten können aber auch durch die Körperhygiene und in Badegewässern durch Haut, Mund und Lunge aufgenommen werden. Tabelle 2.3-1 zeigt die Anzahl der Todesfälle aufgrund unzureichender Sanitär- und Trinkwasserversorgung (WHO, 2023). Am stärksten betroffen sind Menschen in Subsahara-Afrika und Zentral- und Südasien.

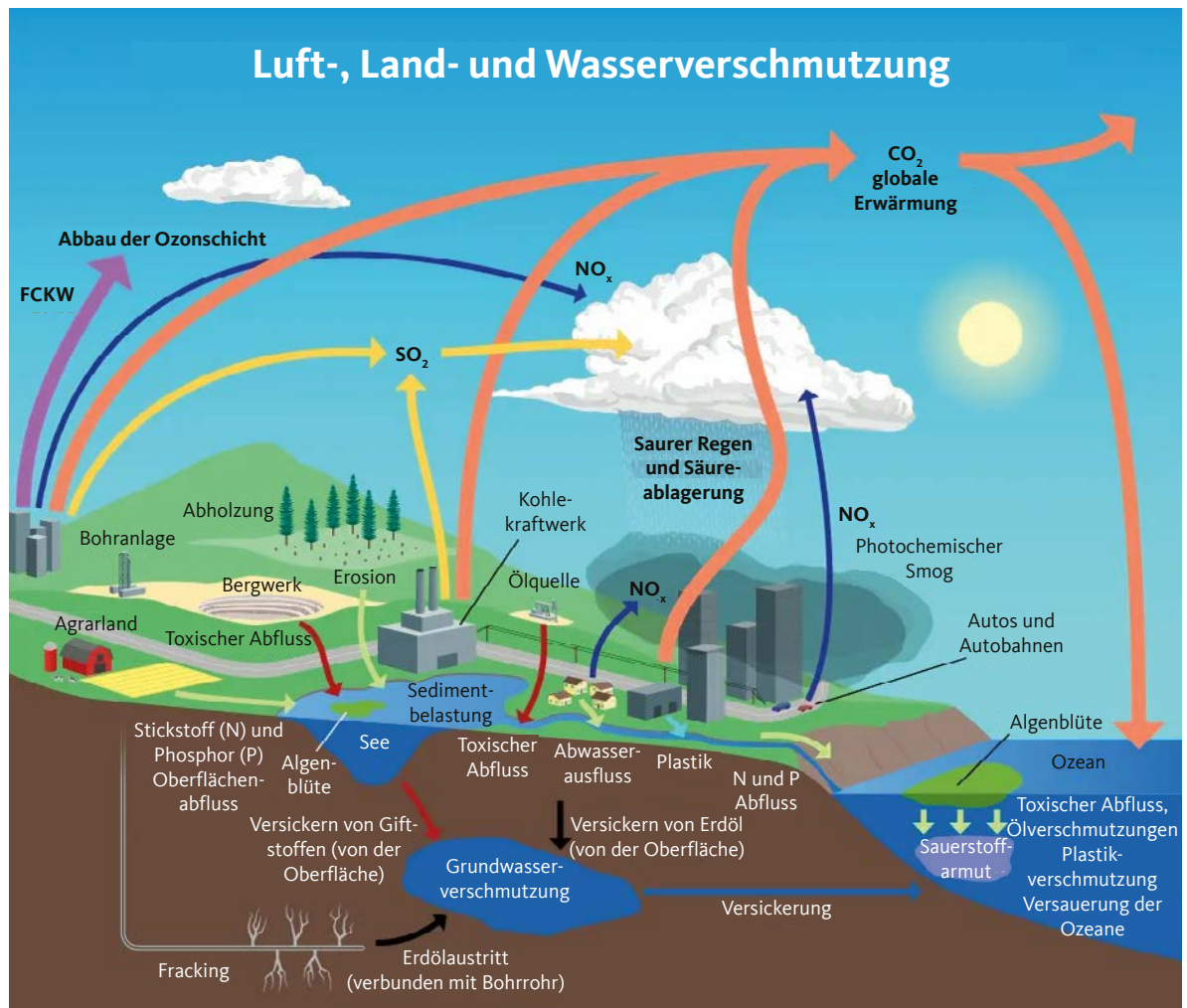


Abbildung 2.3-5

Luft, Land- und Wasserverschmutzung: wesentliche Belastungspfade.

Quelle: Nathanson, 2023

2.3.3.4

Pharmazeutische Wirkstoffe

Insbesondere die Bildung antibiotikaresistenter Keime durch das Aufeinandertreffen von Bakterien mit Antibiotikarückständen aus Haushalten und Viehhaltung (Kap. 2.3, 4.5) stellt eine Gefahr für die Gesundheitsversorgung dar (Sanganyado und Gwenzi, 2019). So wurde entlang von Vorflutern, also Flüssen mit einem hohen Anteil an eingeleiteten Klarwässern, Resistenzen gegenüber verschiedenen Antibiotika nachgewiesen (Hiller et al., 2019; Biggel et al., 2021).

Zahlreiche Untersuchungen zeigen Arzneimittelrückstände in Zu- und Abläufen von Kläranlagen. Unstrittig ist, dass die üblichen Behandlungsschritte der kommunalen Abwasserbehandlung nicht ausreichend sind um diese weitgehend zu entfernen (Duarte et al., 2021; Lipp und Lipp, 2022; Oaks et al., 2004; Sharma et al.,

2022; Toshovski et al., 2020). In Untersuchungen werden immer wieder hohe Rückstände von Schmerzmitteln (z. B. Diclofenac, Ibuprofen, Paracetamol), Antiepileptika, Antidepressiva, Hormone (Östrogene) und Antibiotika nachgewiesen (Abb. 2.3-6; Castillo-Zacarias et al., 2021; Lipp und Lipp, 2022). Hauptverursacher der Einträge von Arzneimittelwirkstoffen in Abwässer sind Gesundheitseinrichtungen und Haushalte. In vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens wird Abwasser aus Siedlungen ohne Abwasserbehandlung direkt in die Gewässer eingeleitet; vielfach werden hierzu kaum oder gar keine Untersuchungen durchgeführt und die Datenlage ist dünn (Barcellos et al., 2022; Kairigo et al., 2020; Waleng und Nomngongo, 2022). Über die Nutztierrhaltung an Land und in Gewässern erfolgt aber auch anderenorts der direkte Eintrag von Antibiotika und anderer Tierarzneimittel in die Gewässer und Aquiferen.

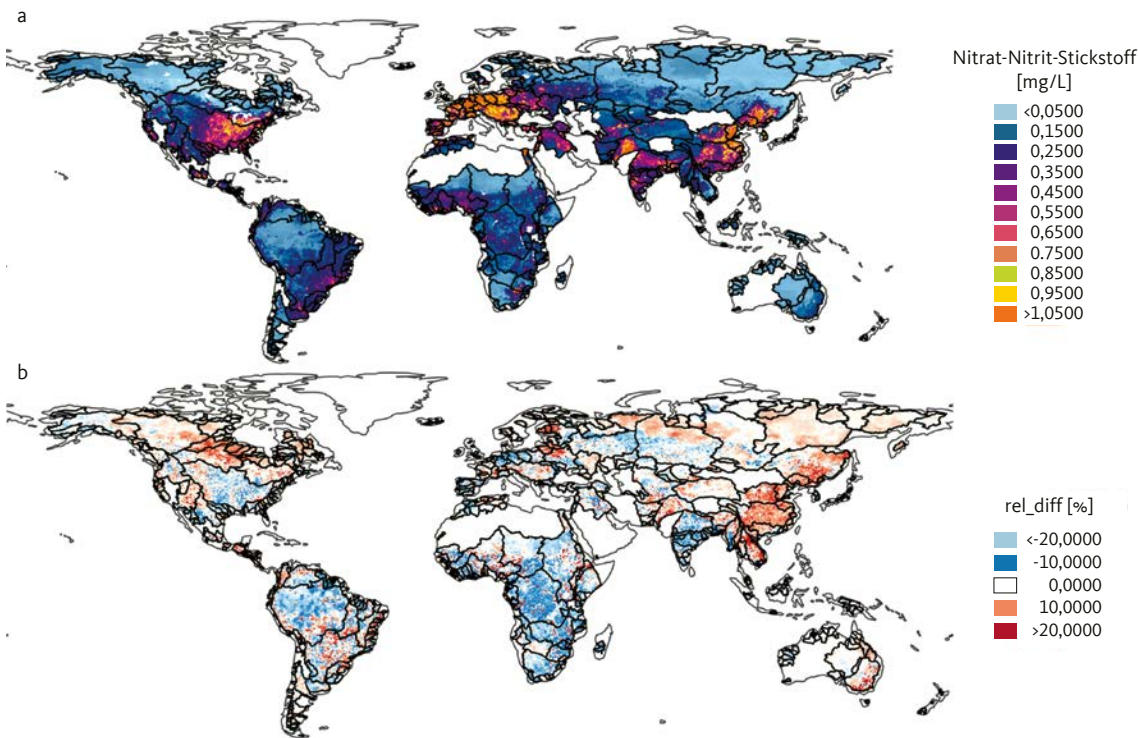


Abbildung 2.3-6
Simulation der Stickstoffbelastung in den großen Flusseinzugsgebieten der Welt. Die Studie fokussiert auf Nitrat-Nitrit-Stickstoff (NOx-N), die vorherrschenden wasserlöslichen Stickstoffverbindungen. (a) zeigt die simulierte globale Karte der NOx-N-Konzentrationen im Durchschnitt der Jahre 1990–2013. (b) zeigt das räumliche Muster der Veränderungen der NOx-N-Konzentrationen von den 1990er Jahren (1990–1999) bis zum letzten Jahrzehnt (2000–2013).
Quelle: Sheikholsami und Hall, 2023

Tabelle 2.3-1
Weltweite Todesfälle durch unzureichende Sanitärverhältnisse und Trinkwasserverschmutzung.
Quelle: WHO, 2023

Gesundheitliche Auswirkung	Anteil der Bevölkerung deren Erkrankung auf unsichere WASH-Verhältnisse zurückgeht	Todesfälle (tausend)	Krankheitslast (in DALYs, tausend)
Durchfall	69 %	1.035	54.590
Akute Atemwegserkrankungen	14 %	356	16.578
Unterernährung	10 %	8	825
Bodenübertragene Wurmerkrankung	100 %	2	1.942
Summe	NA	1.401	73.935

2.3.3.5
Industriechemikalien und Mikroplastik

Eine Vielzahl von Industriechemikalien wurde in den letzten Jahrzehnten auf den Markt gebracht, ohne die gesundheitlichen Risiken für Mensch und Umwelt vollumfänglich abschätzen zu können. Diese Chemikalien werden in großen Mengen hergestellt, um bestimmte Produkteigenschaften von Konsumgütern gewährleisten

zu können. Heute ist wissenschaftlich erwiesen, dass viele dieser Chemikalien aus den Endprodukten freigesetzt werden können, in die Umwelt gelangen und sich auch im menschlichen Körper anreichern (Kumari und Pulimi, 2023). Verunreinigungen mit Industriechemikalien sind weltweit zu finden – einige Stoffe sind bereits ubiquitär. Einträge dieser Industriechemikalien ins Abwasser finden z. B. über Herstellungsprozesse, Reifen-, Brems- und

Metallabrieb, Textilreinigungen in Gewerbe oder Haushalt sowie die Verwendung von Kosmetika oder Kunststoffartikeln statt. Einige der Industriechemikalien wirken als endokrine Disruptoren (wie Hormone). Sie beeinflussen die Fortpflanzungsfähigkeit und die neuronale Entwicklung von Ungeborenen oder Kindern oder erhöhen das Asthma- und Allergierisiko (Abraham und Chakraborty, 2020; Eales et al., 2022; Richardson et al., 2019).

Immer mehr Studien zeigen eine globale Belastung von Süß- bzw. Trinkwasser sowie der Ozeane mit Mikroplastik (Partikel von 1 µm bis zu 5 mm; Koelmans et al., 2019; Mishra et al., 2023; Sharma et al., 2023). Mikroplastik entsteht u. a. direkt durch den Zerfall von Plastikabfall in Gewässern und verteilt sich weiträumig (Koelmans et al., 2019; Li et al., 2020; Mishra et al., 2023; Sharma et al., 2023). Mikroplastik ist persistent und birgt Risiken für Umwelt, Tiere und Menschen. Auch die im Plastik enthaltenen Additive sowie adsorbierte Kontaminanten wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) können toxisch wirken (Anik et al., 2021; Dusaucy et al., 2021; Sharma et al., 2023; Talbot und Chang, 2022; Zadjelovic et al., 2023). Studien über die Gesundheitsauswirkungen sind allerdings bisher nicht ausreichend. PAK entstehen oft als unerwünschte Nebenprodukte bei Produktionsprozessen. Viele Verbindungen dieser Substanzgruppe gelten als krebserzeugend, mutagen und fruchtschädigend (DFG, 2023). Während in Deutschland PAK aufgrund relativ geringer Belastungen im Abwasser kaum eine Herausforderung für die Abwasserbehandlung darstellen (Toshovski et al., 2020), gelangen sie in anderen Ländern über Industrieabwasser, vor allem aus der Erdöl-, Kohle- und Stahlindustrie, oder durch offene Feuerstellen im Haushalt in die Abwässer oder auch ins Grundwasser und stellen eine potenzielle Kontaminationsgefahr für das Trinkwasser dar (Ambade et al., 2021; Mojiri et al., 2019; Zhang et al., 2019).

Emissionen hochkomplexer Chemikalienmischungen, Ruß und Mikroplastik gelangen aus Brems-, Metall- und Reifenabrieb des Straßenverkehrs (Alves et al., 2020; Grigoratos und Martini, 2015) und nachfolgender Auswaschung durch Niederschläge teilweise direkt in die Oberflächengewässer. Über die Aufnahme durch aquatische Lebewesen steht am Ende der Nahrungskette der Mensch als Bioakkumulator von Schadstoffen. Viele der Substanzen sind persistent und können selbst viele Jahre nach ihrem Verbot auch in den entlegensten Orten der Erde nachgewiesen werden. Neben Mikroplastik sind weitere Beispiele hierfür Pestizide auf der Zugschleife (Levy et al., 2017), perfluorierte Substanzen in der kanadischen Arktis (Stock et al., 2007) oder Biozide und Arzneimittelmrückstände in der Antarktis (Duarte et al., 2021).

Im Rahmen der EU-Richtlinie 2008/105/EG (geändert durch 2013/39/EU) wurden Substanzen der Gruppe der Industriechemikalien (darunter PFAS; WBGU,

2023: 194 ff.), PAK und Biozide sowie Schwermetalle (Kap. 2.3.4.6) und deren Verbindungen festgeschrieben, deren Überwachung als prioritär gefährliche Stoffe für die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtend ist (Toshovski et al., 2020).

2.3.3.6

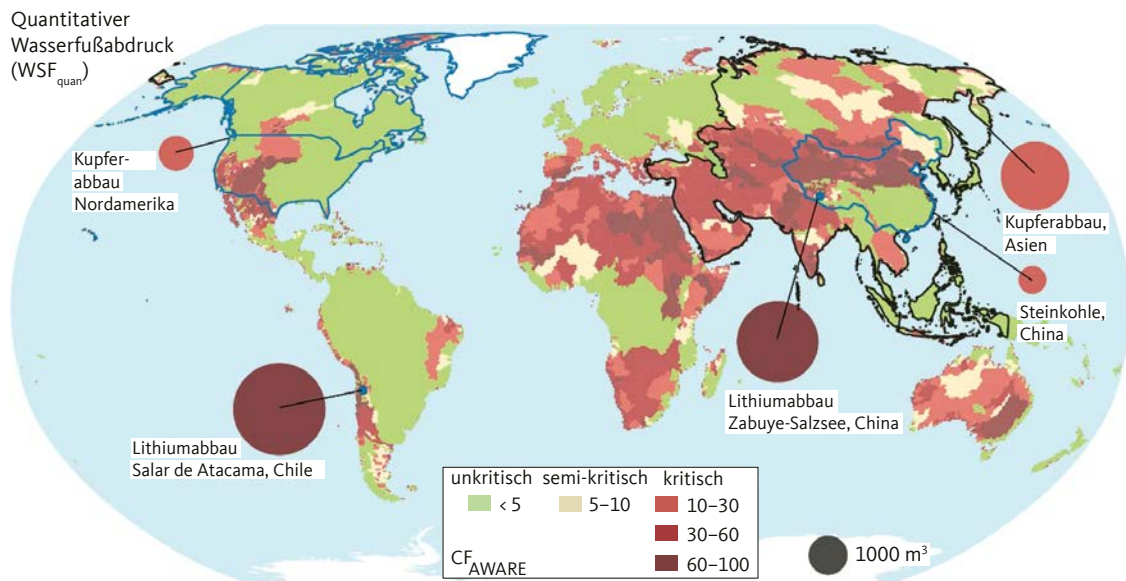
Verschmutzung durch Rohstoffgewinnung und industrielle Aktivitäten

Aufgrund unzureichender Abwasserbehandlung stellen Metalle, sogenannte Schwermetalle und deren Salze sowie weitere im Abbauprozess eingesetzte Chemikalien in vielen Regionen der Erde eine Gesundheitsgefährdung für Milliarden Menschen dar. Der Begriff „Schwermetalle“ wird inkonsistent verwendet und umfasst häufig Elemente, die auch anderen Begriffen zugeordnet sind, z. B. Halbmetalle wie Arsen (Duffus, 2022). Einige dieser Stoffe sind als Spurenelemente lebensnotwendig, sie können in höheren Dosen jedoch das Trinkwasser verunreinigen. Durch ihre Anreicherung in der Nahrungskette sind sie eine Gefahr für ganze Ökosysteme und die Gesundheit der Menschen (Chowdhury et al., 2016; Lee et al., 2023; Rehman et al., 2018). Abwässer aus dem Bergbau enthalten für Ökosysteme und die menschliche Gesundheit problematische Mengen einiger toxischer, löslicher Metallsalze, z. B. Blei-, Kadmium-, Kupfer-, Lithium- oder Quecksilberverbindungen, und werden oft direkt in Oberflächengewässer geleitet.

Die Gewinnung von Materialien wie Erzen, Lithiumsalzen, seltenen Erden und Kupfer ist sehr wasserintensiv und resultiert in erheblichen Einschränkungen der Wasserqualität. Zwei Drittel der größten Minen befinden sich in Ländern mit starkem Wassermangel (Madaka et al., 2022; Bogardi et al., 2021). Abbildung 2.3-7 zeigt als Beispiel den „water scarcity footprint“ von Lithium-, Kupfer- und Kohleabbau für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien.

Nebenprodukte des Rohstoffabbaus z. B. aus den Erzen, Prozesschemikalien und die abgebauten Stoffe selbst können durch Leckagen oder Abraum in Gewässer gelangen und sich negativ auf die Umwelt und potenziell auf die menschliche Gesundheit auswirken (Obasi und Akudinobi, 2020; Adeel et al., 2023; WBGU, 2023). Ein Beispiel ist die Wasserverschmutzung durch arsenhaltigen Abraum aus dem Erzabbau bei der Kobaltgewinnung in Marokko (Blum et al., 2023).

Im Prozessabwasser des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien finden sich wiederum Kobalt, Lithium und Phosphor. Teilweise wirken sie schon in geringen Konzentrationen toxisch, und für Lithium ist noch kein Grenzwert für in Gewässer eingeleitete Industrieabwässer sowie für Trinkwasser festgelegt (Adeel et al., 2023; Mrozik et al., 2021; Wagner-Wenz et al., 2023).

**Abbildung 2.3-7**

Wasserknappheitsfußabdruck der Abbauprozesse von Rohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien. Beschrieben ist der quantitative Wasserknappheitsfußabdruck WSF_{quan} der relevantesten Prozesse entlang der Lieferkette von Lithium-Ionen-Batterien. Die Karte basiert auf den Risikodefinitionen nach dem DIN EN ISO-konformen Ansatz AWARE (Available Water REMaining), der den Wasserverbrauch durch Menschen und den Wasserbedarf der Umwelt mit der hydrologischen Wasserverfügbarkeit vergleicht. Die Kreise bilden den quantitativen Wasserknappheitsfußabdruck (WSF_{quan}) an den Orten der jeweiligen Prozesse ab. Die Farbe der Kreise repräsentiert die AWARE-Charakterisierung als unkritisch, semikritisch und kritisch. Die blauen und schwarzen Linien umreißen die in der Bilanzierung betrachteten Regionen bzw. Länder, blaue Punkte stellen Punktkoordinaten dar.

Quelle: Schomberg et al., 2021

Blei-, Kadmium- und Kupferverbindungen gelangen auch durch landwirtschaftliche Tierhaltung und Düngung in die Gewässer. In anderen Ländern stammt Arsen häufig aus natürlichen Quellen, aus der Industrie sowie aus dem Bergbau, z. B. beim bereits beschriebenen Lithiumabbau, und stellt dann ein fortlaufende Kontaminationsquelle für das Trinkwasser dar (Srivastava, 2020).

Die Gesundheitsauswirkungen von Schwermetallen und deren Verbindungen reichen von Entwicklungsstörungen, neurologischen Erkrankungen und Organschädigungen bis hin zu Krebserkrankungen. In vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sind die Kontaminationen von Trinkwasser oder Oberflächengewässern aufgrund fehlenden Monitorings und Untersuchungen praktisch nicht bekannt (Kumar et al., 2019; Wołowiec et al., 2019). Weltweit werden 80 % der Industrieabwässer ungereinigt in die Gewässer geleitet (GCEW, 2023a). Darin enthaltene Schwermetalle und andere Chemikalien sind ein ernstzunehmendes Gesundheitsrisiko für die Ökosysteme und über das Trinkwasser und die Nahrungskette auch für den Menschen.

2.4

Politische und rechtliche Aspekte von Wasser

Dieses Kapitel stellt die Vielfalt unterschiedlicher Wassergovernanceansätze vor: Es geht auf die Genese von drei Ansätzen des Wassermanagements an den Schnittstellen von ökosystemaren und gesellschaftlichen Herausforderungen ein, die international am stärksten diskutiert werden. Auf diesen kurzen Überblick folgt die Diskussion staatlicher (formaler, de jure) Governance anhand einiger Beispiele auf regionaler Ebene und nicht staatlicher (informeller, de facto) Wassergovernance anhand von Beispielen auf lokaler Ebene mit besonderem Blick auf das Zusammenspiel der beiden. Neben formalen (de jure), d. h. rechtsverbindlichen Formen der Wassergovernance spielen auch informelle Institutionen und Regelauslegungen in der Umsetzung eine wichtige Rolle. Institutionen werden dabei verstanden als Vorgaben, die Interaktionen strukturieren, d. h. Regeln und Normen, die durch Organisationsstrukturen sowie ihre Einforderung und Befolgung institutionalisiert werden (North, 1991). Hierbei ist zu unterscheiden zwischen formalisierten,

2 Status quo im Umgang mit der Ressource Wasser

also verschriftlichten Institutionen mit Rechtsstatus (z. B. Verfassungen, Gesetze) und nicht formalisierten, aber gelebten Institutionen (z. B. Tabus, Traditionen, Verhaltensregeln; North, 1991: 97). Diese binäre Unterteilung ist eine Vereinfachung, d. h. formell und informell sind nicht immer klar voneinander zu trennen (Greif, 2006; Mielke et al., 2011; Hodgson, 2006).

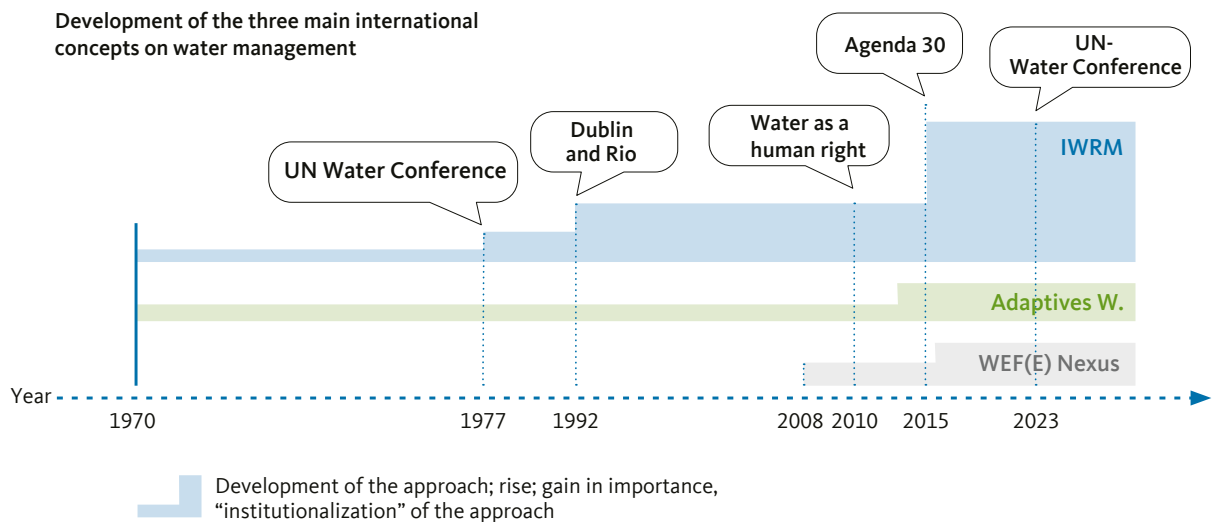
Nicht alle global relevanten Fragen können hier untersucht werden – etwa wem das Wasser gehört, wer es wie nutzen darf oder wer verantwortlich für die Wasserqualität und -verfügbarkeit ist. Diese Fragen werden im Folgenden nur kurz angesprochen, aber nicht beantwortet. Dazu bedarf es rechtsvergleichender Forschung (Thomashausen et al., 2018; Civic, 1998; Araral und Yu, 2013).

2.4.1

Internationale Leitbilder

Auf internationaler Diskurs- und Politikebene existieren drei große Strömungen zur Wassergovernance: das Integrierte Wasserressourcenmanagement (IWRM), der Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus (WEFE Nexus) und das adaptive Wasserressourcenmanagement (Abb. 2.4-1).

Diese Ansätze überschneiden sich. Sie alle adressieren den Umgang mit der Ressource Wasser und damit einhergehenden Nutzungskonflikten zwischen verschiedenen Sektoren wie dem Wasser-, Energie- und Ernährungssektor. Sie berücksichtigen Ökosysteme und die Bewältigung von Wasserverschmutzung und



APPROACH	FOCUS	ORIGIN
IWRM	Coordination in the water sector	Administration, planning
Adaptive Water Resource Management	Iterative crisis adaptation	Ecology
WEF(E) Nexus Interdependencies between sectors	Interdependencies between sectors	World Economic Forum, context of the financial crisis 2007/08

Abbildung 2.4-1

Internationale Leitbilder für Wassergovernance im Überblick. Der Zeitstrahl illustriert die Entwicklung und den Bedeutungsgewinn der Konzepte IWRM, adaptives Wassermanagement und WEFE Nexus. Die Konzepte überschneiden sich inhaltlich, unterscheiden sich jedoch in Fokus und Ursprung.

Quelle: WBGU

wasserbezogenen Extremereignissen. In der Umsetzung treffen diese Lösungsansätze auf vielfältige Schwierigkeiten, vor allem institutioneller, politisch-administrativer und finanzieller Natur. Die Ansätze unterscheiden sich jedoch auch in ihrem Fokus, ihren Akteuren und ihren Anwendungsgebieten.

2.4.1.1

Integriertes Wasserressourcenmanagement

Integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM) gilt als ein Paradigma, das weltweit Anwendung findet (Hack et al., 2017). Der Ansatz bezweckt eine gerechte und partizipativ organisierte Verteilung der knappen Ressource Wasser zwischen verschiedenen Sektoren.

Das heutige Verständnis von IWRM als ganzheitlichem Ansatz basiert sowohl auf den Dublin-Prinzipien von 1992 als auch auf der Agenda 21 (Meran et al., 2021b). Die vier IWRM-Prinzipien sind: (1) Wasser ist eine endliche und gefährdete Ressource. (2) Die Entwicklung und die Bewirtschaftung von Wasser sollten auf einem partizipativen Ansatz beruhen, der Nutzer, Planer und politische Entscheidungsträger auf allen Ebenen einbezieht. (3) Frauen spielen eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung, Bewirtschaftung und Sicherung von Wasser. (4) Wasser ist ein öffentliches Gut und hat in all seinen konkurrierenden Nutzungsarten einen sozialen und wirtschaftlichen Wert (GWP, 1996).

IWRM hat eine systemische Bewirtschaftung von Wasser, Land und verwandten Ressourcen zum Ziel und berücksichtigt neben der wirtschaftlichen gleichberechtigt auch die soziale und ökologische Dimension. Die inklusive Beteiligung einer Vielfalt von Akteuren aus unterschiedlichen Sektoren (sowie aus lokalen Gemeinschaften) zeichnet den Ansatz aus. IWRM wird definiert als ein „Prozess, der die koordinierte Entwicklung und Management von Wasser, Land und verwandten Ressourcen fördert, um den daraus resultierenden wirtschaftlichen und sozialen Wohlstand auf gerechte Weise zu maximieren, ohne die Nachhaltigkeit lebenswichtiger Ökosysteme zu gefährden“ (Agarwal et al., 2000: 22; eigene Übersetzung). Im Rahmen der Agenda 2030 ist die Umsetzung von IWRM ein Indikator für das Unterziel SDG 6.5 (IWRM-Fortschritt), das Konzept hat dadurch international eine hohe Relevanz. Der IWRM-Ansatz mit seinen Dublin-Rio-Prinzipien und Instrumenten muss zur Umsetzung für die jeweiligen Kontexte interpretiert werden (GWP, 1996). Um die Anwendung der IWRM-Prinzipien in der Praxis zu unterstützen, hat die Global Water Partnership (GWP) eine Toolbox entwickelt. Die vier Kernelemente darin sind ein förderliches Umfeld, institutionelle Strukturen, Managementinstrumente und Entwicklung von Infrastruktur. Abbildung 2.4-2 veranschaulicht auf vereinfachte Weise die Rolle von IWRM in der Umsetzung von Wassergovernance.

Der Kreislauf zeigt die Schritte, die ein Staat unternehmen kann, um seine Wasserressourcen nachhaltig und integriert zu bewirtschaften. Der Prozess beginnt mit der Formulierung politischer Ziele (im Kontext aktueller globaler Ziele) und erfordert zunächst eine empirische Datenerfassung. Es folgt die Ausformulierung eines IWRM-Plans oder einer Wasserstrategie und die Umsetzung von Maßnahmen sowie ein fortlaufendes Monitoring und eine Evaluation der Umsetzung (GWP, 2024b).

Während IWRM konzeptionell einige Stärken im Vergleich zu traditionellem Wassermanagement hat, bestehen oftmals Defizite in der Umsetzung. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen stellt große Unterschiede zwischen Niedrig- und Mitteleinkommensländern und Hocheinkommensländern bei der weltweiten Umsetzung des IWRM fest (Abb. 2.4-3).

Die Umsetzungsprobleme beruhen auf einem erheblichen Mangel an institutioneller Kapazität, fehlendem politischen Willen für sektorübergreifende Governance (Horlemann und Dombrowsky, 2012; Kim und Hornidge, 2016; Pahl-Wostl, 2019), fehlenden finanziellen Mitteln sowie einer Rivalität zwischen Sektoren (z. B. Wasser für Nahrungsmittel oder für Energie) und deren unterschiedlicher politischer Unterstützung (Houdret et al., 2014). Da sich das IWRM an hydrologischen Grenzen orientiert (Kurian, 2017) und nicht an politisch-administrativen Grenzen, ist die Steuerung über alle Governanceebenen erschwert. Der IWRM-Ansatz wird zudem dafür kritisiert, offen zu lassen, was, wie und von wem „integriert“ werden soll (Biswas, 2004), und als zu koordinationsaufwendig und damit auch ressourcen-aufwendig beschrieben. Darüber hinaus würden Geber dazu neigen, insbesondere in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens Blaupausen zu implementieren, statt lokale Möglichkeiten einzubeziehen. Ein Beispiel ist die gebergeförderte, staatliche Gründung von Wassernutzergemeinschaften in großen Teilen Zentralasiens gegen Ende der 1990er und in den 2000er Jahren (Kim und Hornidge, 2016).

Eine weitere Schwachstelle von IWRM ist neben den Defiziten der Umsetzung die bisher fehlende Berücksichtigung von Auswirkungen des Klimawandels und dem Ende der Stationarität. IWRM sieht bisher keinen standardisierten Einbezug von Projektionsdaten vor, die Veränderungen durch den Klimawandel berücksichtigen.

Die vom BMBF finanzierte Fördermaßnahme „Globale Ressource Wasser“ (GroW) verknüpft globale Analysen mit lokalen Lösungsansätzen. Insbesondere das Projekt „STEER“ adressiert Herausforderungen in der Umsetzung von IWRM (BMBF, 2024a).

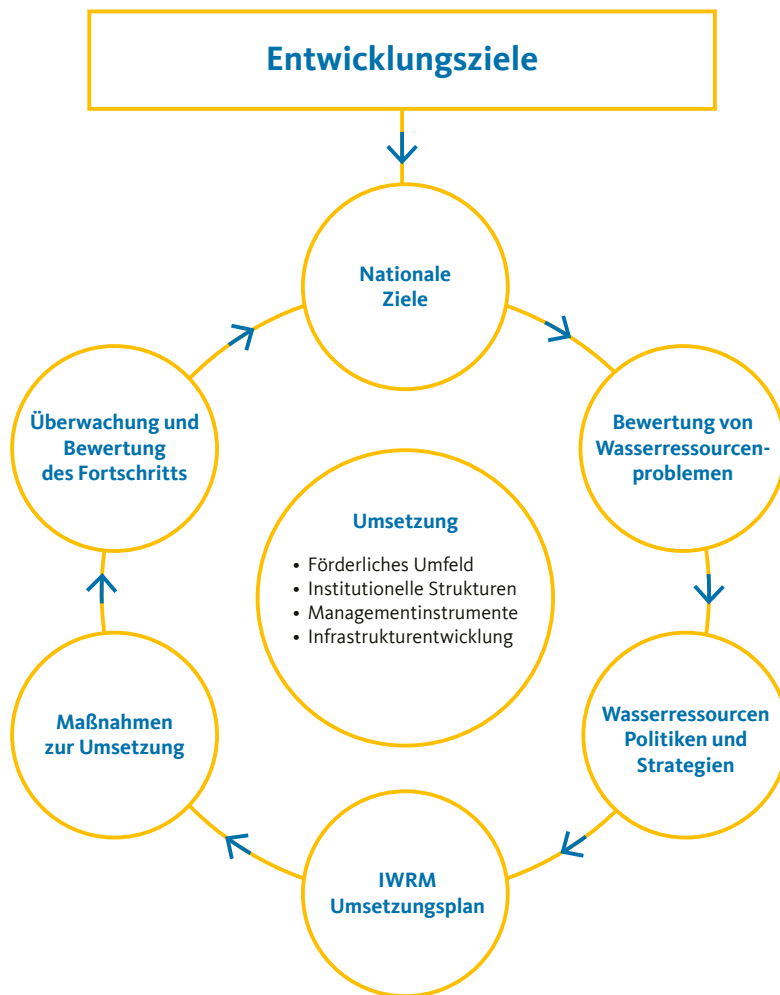


Abbildung 2.4-2

Politikzyklus mit Planungs- und Implementierungsphasen von Integriertem Wasserressourcenmanagement (IWRM). Nationale Entwicklungsziele, z. B. im Rahmen der Agenda 2030, geben Staaten Anlass dazu, ihre Wasserressourcen zu erfassen und eine Strategie für deren integrierte Nutzung zu formulieren. In einem IWRM Umsetzungsplan können Maßnahmen formuliert werden aus denen sich Aktionen ableiten. Die Umsetzung der Aktionen sollte systematisch überprüft und evaluiert werden.

Quelle: GWP, 2024b

2.4.1.2

Adaptives Wasserressourcenmanagement

Durch zunehmende Unsicherheiten und Instabilitäten infolge der deutlicher werdenden Auswirkungen des Klimawandels wurden insbesondere in den letzten 15 Jahren neue Diskussionen über adaptive Ansätze in Gang gesetzt (Pahl-Wostl, 2007, 2008; Pahl-Wostl et al., 2006, 2007). Im Unterschied zu den bisherigen Ansätzen, die darauf abzielen, Systeme zu stabilisieren und natürliche Schwankungen zu minimieren, arbeitet adaptives Wassermanagement nicht gegen die Veränderungen im Wasserhaushalt an. Adaptive Ansätze argumentieren für soziales Lernen und Flexibilität, um schnell und angemessen auf veränderte Umweltbedingungen und deren Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und das Management von Wasser reagieren zu können, aber auch, um längerfristig mit sich verändernden Umweltbedingungen, z. B. Niederschlagsmustern, Schritt zu halten.

Die Komplexität und damit einhergehende Unsicherheit werden anerkannt und es wird versucht, mit dem Wandel zu leben – im Sinne eines Handelns unter Unsicherheit und Lernens aus kontrolliertem Experimentieren – und die Resilienz der sozial-ökologischen Systeme derart zu stärken, dass sie unvorhergesehene Ereignisse „absorbieren“ können. Um Probleme ökologischer Resilienz mit technischen Lösungen, gesellschaftlicher Einbindung und der Förderung gesellschaftlicher Widerstandsfähigkeit zu adressieren (Allan et al., 2008), ist der Ansatz des adaptiven Wasserressourcenmanagements eine Antwort auf die eher lineare IWRM-Praxis (Herrfahrdt-Pähle, 2010).

2.4.1.3

Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus

Der Water-Energy-Food (WEF) Nexus wurde ursprünglich weitgehend von privatwirtschaftlichen Akteuren und als Teil der Ernährungs-, Energie- und Finanzkrisen

der Jahre 2007–2008 entwickelt und 2008 beim World Economic Forum vorgestellt. In den Folgejahren wurde das Konzept erweitert, um Ökosysteme ausreichend zu berücksichtigen (Water-Energy-Food-Ecosystem bzw. WEFE Nexus). IWRM und der WEFE Nexus sind eng miteinander verwandt. Sie unterscheiden sich in erster Linie darin, dass IWRM bei der Wasserressource ansetzt, während Nexus-Ansätze alle Elemente von Anfang an als ein zusammenhängendes System betrachten (GWP, 2024a).

Mit dem Ziel, Politikkohärenz zu verbessern und die Interdependenzen zwischen den Zielen für nachhaltige Entwicklung besser zu verstehen und zu managen (Srigiri und Dombrowsky, 2021, 2022), hat sich der WEFE Nexus in den letzten zehn Jahren als nützliches Konzept herauskristallisiert. Er wird unter anderem im BMZ neben dem IWRM-Ansatz als zweites wichtiges Leitbild der deutschen Entwicklungszusammenarbeit im Wassersektor in die Anwendung getragen (BMZ, 2023). Dieser Ansatz steht allerdings vor eigenen Herausforderungen der Umsetzung, und dies betrifft vor allem die komplexe Wirkungsmessung. So ist beispielsweise die quantitative Erhebung und Messung von Zielkonflikten, die aus den komplexen Wechselbeziehung zwischen den Sektoren entstehen, in den meisten Wassermanagementkontexten aufgrund der Datenlage und methodischen Herausforderungen nicht sicherzustellen (Albrecht et al., 2018). Dies erschwert auch die weitere Verbreitung des Ansatzes in der politischen Praxis zahlreicher Länder, wie Dombrowsky et al. (2022a) für Jordanien beschreiben.

2.4.2

Staatliche Wassergovernance

Das Zusammenspiel (zwischen-)staatlicher Governance (de jure) mit nicht staatlichen, selbstorganisierten Akteuren und gelebter Praxis (de facto) prägt die Umsetzung von Wassergovernance. Im folgenden Abschnitt werden wasserrechtlich relevante Abkommen und Richtlinien auf globaler, regionaler und nationaler Ebene vorgestellt, die den Status quo im Umgang mit Wasser prägen.

2.4.2.1

Völkerrechtlich bindende Konventionen

Neben zahlreichen bilateralen Verträgen regeln zwei Konventionen den Umgang mit Wasser auf internationaler Ebene: Das Übereinkommen über die nichtschiffahrtsrechtliche Nutzung internationaler Wasserläufe von 1997 (UN Convention on the Law of the Non-Navigational Uses of International Watercourses, kurz: UN-Gewässerkonvention) und das 1992 verabschiedete Übereinkommen zum Schutz und zur Nutzung grenzüberschreitender Wasserläufe und internationaler Seen (UNECE Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes, kurz: UNECE-Wasserkonvention).

Beide konkretisieren und erweitern die drei wesentlichen völkerrechtlichen Regeln im Bereich grenzüberschreitender Wasserkörper: (1) angemessene und vernünftige Nutzung (equitable and resonable utilization), (2) das Schädigungsverbot (no harm rule) und (3) die

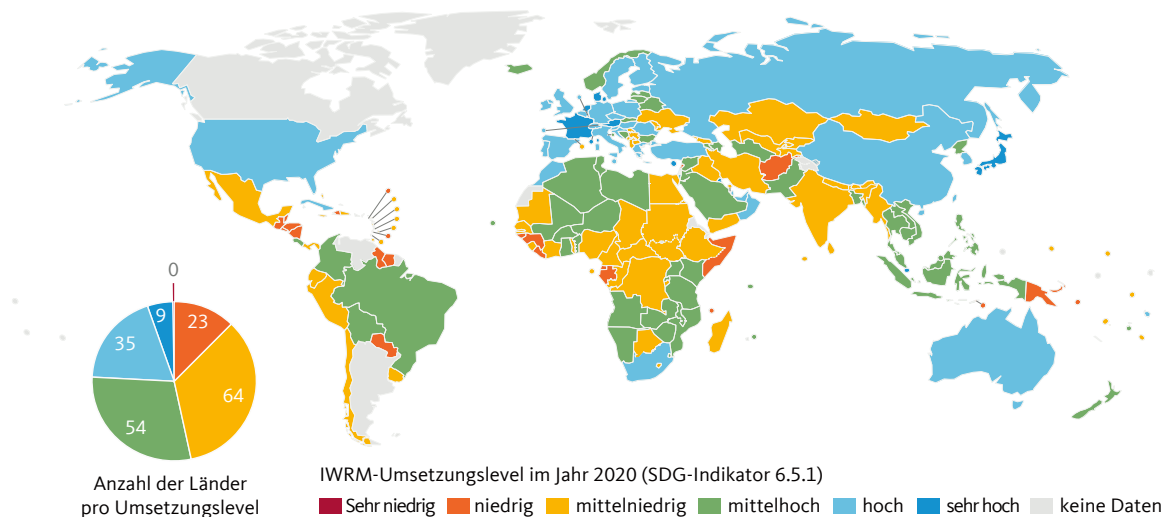


Abbildung 2.4-3

Umsetzung von Integriertem Wasserressourcenmanagement (IWRM) in einzelnen Ländern, gemessen anhand des SDG 6.5.1-Indikators im Jahr 2020.

Quelle: UNEP, 2021b

Pflicht zur Kooperation (Mbengue und Cima, 2023). Das Schädigungsverbot schränkt staatliche Souveränität in der Weise ein, dass die Nutzung des eigenen Territoriums zu keiner erheblichen Beeinträchtigung fremden Staatsgebiets führen darf. Der Grundsatz der angemessenen und vernünftigen Nutzung berechtigt einen Anrainerstaat zu einem gerechten und angemessenen Anteil an den Nutzungen oder Vorteilen des jeweiligen Wasserlaufs, verpflichtet also zu einer Abwägung zwischen den Interessen aller Nutzerstaaten (Laskowski, 2010) und ist als ein Eckpfeiler des internationalen Wasserrechts auch mittlerweile Teil des Gewohnheitsrechts (ICJ, 1997). Die Konventionen verpflichten zudem zu einer nachhaltigen Nutzung grenzüberschreitender Wasserkörper und enthalten Umweltschutzvorschriften (McCaffrey und Sinjela, 1998), die jedoch verglichen mit nationalen Regelungen oder der EU-Wasserrahmenrichtlinie (RL 2000/60; Kap. 2.4.2.2) nicht sehr detailliert sind und als unzureichend kritisiert wurden (Dellapenna und Gupta, 2009). Die UN-Gewässerkonvention sieht etwa die Verpflichtung zur Erhaltung von Ökosystemen und die Verpflichtung zur Vermeidung von Verschmutzung vor, wobei Qualitätsnormen und Indikatoren erst noch von den jeweiligen Anrainerstaaten in nachfolgenden Vereinbarungen festgelegt werden müssen. Der Aspekt der Vermeidung von Verschmutzung ist in der UNECE-Wasserkonvention stärker ausgeprägt. Sie etabliert auch eine institutionelle Struktur mit Sekretariat, anders als die UN-Gewässerkonvention. Die Vertragsstaaten konnten sich zudem auf ein ergänzendes Protokoll zu Wasser und Gesundheit einigen, das zur Ergreifung von Maßnahmen zur Vermeidung, Kontrolle und Reduktion wasserbezogener Krankheiten verpflichtet (UNECE, 1999).

Die Regionalität von Wasseraspekten zeigt sich am Charakter beider Konventionen als Rahmenkonventionen, die ausdrücklich auch die Möglichkeit einräumen, weitere bi- und multilaterale Abkommen zu schließen, die die Grundsätze der Konventionen beachten, aber von ihr mit Blick auf die Umstände des jeweiligen Einzelfalls abweichen können. Beide Abkommen können also als Plattformen für die Bildung zwischenstaatlicher Kooperationen auf regionaler Ebene und zur Erstellung von Programmen und Strategien zum Gewässerschutz verstanden werden. Beide Konventionen enthalten positive Ansätze, etwa das Leitbild der Nachhaltigkeit und – für Verträge mit potenziell globalem Geltungsbereich – sachgerechte Prinzipien und Instrumente. Ihre Effektivität ist jedoch unter anderem dadurch gemindert, dass nicht viele Staaten sie ratifiziert haben (UN-Gewässerkonvention: 38; UNECE-Wasserkonvention: 52); große und einflussreiche Staaten wie die USA, China, Indien und Brasilien fehlen. Grund dafür ist das Spannungsverhältnis zwischen den Regeln der angemessenen und vernünftigen Nutzung auf der einen und dem Schädigungsverbot auf

der anderen Seite. Umstritten ist, wie weit das Recht zur Nutzung natürlicher Ressourcen im Sinne der angemessenen Nutzung reicht und ab wann ein Verstoß gegen das Schädigungsverbot vorliegt, etwa beim Bau eines Staudamms. Flussaufwärts liegende Staaten werden im Zweifel immer ersteres betonen, flussabwärts liegende Staaten hingegen das Schädigungsverbot weit verstehen (Tanzi, 2020). Deshalb kam die Mindestanzahl von Ratifikationen für die UN-Gewässerkonvention erst 17 Jahre nach ihrer Verabschiedung zustande (Mager, 2015) und stagniert dort; seit Inkrafttreten 2014 kamen erst drei weitere Ratifikationen hinzu. Hingegen geht der Trend bei der UNECE-Wasserkonvention zur Zunahme der Ratifikationen. Nachdem die Ratifikation zu Beginn auf europäische Staaten beschränkt war, kommen nun vermehrt auch nicht europäische Staaten hinzu.

2.4.2.2

EU-Wasserrahmenrichtlinie: Ansätze für Multi-Ebenen-Governance

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (RL 2000/60) ist ein Beispiel einer rechtlich verbindlichen Ausgestaltung eines Flussgebietsmanagements, das sich neben Flüssen auch auf Binnenoberflächengewässer, Übergangsgewässer, Küstengewässer und das Grundwasser erstreckt.

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie regelt Ziele, Instrumente und Verfahren, bedarf allerdings weiterer Konkretisierung. Sie bezweckt, Binnenoberflächengewässer, Übergangsgewässer, Küstengewässer und das Grundwasser zu schützen, indem eine Verschlechterung vermieden (Verschlechterungsverbot) sowie der Zustand der aquatischen Ökosysteme (inklusive Wasserqualität), eine nachhaltige Wassernutzung (Wasserquantität), die aquatische Umwelt verbessert (Verbesserungsgebot) und die Verschmutzung des Grundwassers reduziert und die Auswirkungen von Überschwemmungen und Dürren vermindert werden (Art. 1). Sowohl das Verbesserungsgebot als auch das Verschlechterungsverbot mit Blick auf den guten Gewässerzustand sind verbindlich ausgestaltet auch gegenüber Einzelvorhabenzulassungen durchsetzbar (Durner, 2019: 3). Die Mitgliedstaaten werden zur Einhaltung von Umweltqualitätsnormen verpflichtet, die in Art. 4 in Verbindung mit Anhang V konkretisiert werden und festlegen, was als guter chemischer, guter ökologischer und guter Mengenzustand des Wassers zu qualifizieren ist. Der ökologische Zustand bezieht sich auf die Qualität von Struktur und Funktionsfähigkeit aquatischer, in Verbindung mit Oberflächengewässern stehender Ökosysteme und wird anhand von Indikatororganismen gemessen. Der chemische Zustand bezieht sich auf die Konzentration bestimmter chemischer Schadstoffe. Die Konkretisierung der Qualitätsnormen für den ökologischen Zustand erfolgt durch die Mitgliedstaaten, für den chemischen Zustand durch die EU (Ginzky, 2009:

244). Als Instrument zur Zielerreichung wird zudem ein behördliches Planungsregime für das Wassermanagement eingeführt, das sich auf Einzugsgebiete von Flussgebietseinheiten als relevante geografische Größe bezieht (Art. 3, 11, 13 in Verbindung mit Anhang VII). Das Management von Wasserressourcen auf Flussgebietsebene zielt darauf, hydrologische Einzugsgebiete über politische Grenzen hinweg zu verwalten und zu bewirtschaften (Dombrowsky et al., 2014). Dabei wird der Einbindung zivilgesellschaftlicher Akteure und aller vom Wassermanagement direkt betroffenen Gruppen eine hohe Bedeutung zugemessen. Untersuchungen zeigen, dass die Art der Einbindung in verschiedenen Teilen Europas sehr unterschiedlich ist (Rimmert et al., 2020). Dies kann Ursache dafür sein, dass sich Interessensvertretungen von Landwirtschaft und Umweltorganisationen in der Regel stärker einbringen, während weniger gut organisierte Bürger:innen häufig kaum Raum in den Beteiligungsverfahren beanspruchen.

Dieser Fokus auf Flussgebietseinheiten steht im Gegensatz zur bis dahin vorherrschenden Regulierung einzelner Verschmutzungsquellen auf lokaler Ebene, die keinen effektiven systemischen Schutz des Wassers bewirkte. Gleiches gilt für den Aufbau eines Überwachungsnetzes für Gewässer und die Beteiligung der Öffentlichkeit innerhalb der EU-Mitgliedstaaten (UBA, 2021b: 4). Gleichwohl bestehen auch 20 Jahre nach Inkrafttreten der EU-Wasserrahmenrichtlinie erhebliche Defizite bei der Erreichung der Ziele. Während fast alle Grundwässer etwa in Deutschland einen guten mengenmäßigen Zustand und ca. zwei Drittel einen guten chemischen Zustand aufweisen, ist kein Oberflächengewässer in einem guten chemischen Zustand, und nur 9 % sind in einem guten ökologischen Zustand (BMUV, 2022: 17). Europaweit erreichen nur drei Mitgliedstaaten 70–100 % der Ziele für ihre Flussgebietseinheiten (Europäische Kommission, 2021b: 4). Gründe dafür sind das Fehlen eines rechtlich kohärenten Ansatzes sowie Umsetzungsdefizite.

Obwohl es ein Ziel der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist, den bisherigen Flickenteppich an verschiedenen Richtlinien zu beseitigen, wurden ab 2006 eine Reihe von Tochterrichtlinien zur EU-Wasserrahmenrichtlinie mit jeweils eigenem Regelungsansatz erlassen, die unterschiedliche Wasserbereiche (Oberflächengewässer, Grundwässer, Badegewässer, Trinkwasser) betreffen. Die EU-Wasserrahmenrichtlinie bietet zwar einen Rahmen, durch den eine weitere sekundärrechtliche Ausdifferenzierung und eine Konkretisierung der Qualitätsnormen ermöglicht wird. Dieser Rahmen ist jedoch innerhalb des Wasserrechts fragmentiert und wenig kohärent mit anderen, ebenfalls für den Gewässerschutz relevanten Normen (Breuer und Gärditz, 2017: Rn. 135). Die Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie lassen sich mit anderen Worten nicht allein durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen erreichen (Durner, 2019: 11 f.) und müssen

besser in andere Politikbereiche wie Landwirtschaft, Energie und Verkehr integriert werden (Europäische Kommission, 2021b: 1).

Hinzu kommen Umsetzungsdefizite, bedingt vor allem durch unzureichende finanzielle Mittel der mitgliedstaatlichen Verwaltungen (Europäische Kommission, 2021b: 17 f.). Bei einer Überprüfung der EU-Wasserrahmenrichtlinie sowie mehrerer Tochterrichtlinien identifizierte die EU-Kommission folgende Hindernisse für eine effektivere Erreichung der Ziele: Viele Mitgliedstaaten setzten vor allem auf technische Lösungen für punktuelle Verschmutzungen, während diffuse Quellen kaum adressiert wurden. Zudem bedürfe es häufig auch Wiederherstellungsmaßnahmen für Ökosysteme, um Verbesserungen des Gewässerzustands zu erreichen. Die Komplexität der Herausforderungen sei ein weiterer Faktor, der Durchsetzbarkeit und Verantwortung der Mitgliedstaaten im Wege stehe.

Aufgrund ihres dennoch überwiegend als positiv bewerteten Ansatzes wird die EU-Wasserrahmenrichtlinie auch in anderen Weltregionen als Governanceansatz aufgegriffen (Zeitoun et al., 2013; Molle, 2009; Mostert et al., 2007; Wester und Warner, 2002), wobei lokale Anpassungen erforderlich sind (Heldt et al., 2017). Im Vergleich zu Ansätzen außerhalb der EU, z. B. dem IWRM-Ansatz (Kap. 2.4.1.1), legt die EU-Wasserrahmenrichtlinie einen Schwerpunkt auf die Wasserqualität und setzt hierfür auf recht detaillierte verbindliche Regelungen.

2.4.2.3

Kommunalabwasserrichtlinie

Das EU-Parlament und der Rat einigten sich im Januar 2024 auf eine Neufassung der Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG), die wichtige neue Ansätze enthält. Diese Einigung wurde zudem im April 2024 vom EU-Parlament formal in erster Lesung angenommen (Europäisches Parlament, 2024b). Die Annahme durch den Rat steht noch aus und wird voraussichtlich im Herbst 2024 erfolgen. Vier dieser Ansätze sind hervorzuheben:

Erstens soll dem Verursacher- und Vorsorgeprinzip durch die Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung Rechnung getragen werden (Art. 9, 10; Anhang III). Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetika müssen sich an den Kosten einer vierten Reinigungsstufe in Abhängigkeit von den Mengen und der Toxizität der in Verkehr gebrachten Produkte beteiligen. In Reinigungsstufe eins erfolgt die mechanische, in den Reinigungsstufen zwei und drei die biologische Abwasserreinigung mit Entfernung von Nährstoffen wie Stickstoffe und Phosphate; die vierte Reinigungsstufe soll Spurenstoffe durch Ozonung oder Aktivkohleadsorption entfernen. Die Kostenpflichtigkeit dient nicht nur der Finanzierung, sondern dürfte mittelbar vorsorgend eine schadstoffärmere Herstellung bewirken. Das UBA schlägt sogar

vor, alle Hersteller wasserverunreinigender Produkte einzubeziehen, da dies zu einer höheren Akzeptanz der Richtlinie führen kann (UBA, 2023d: 8).

Zweitens sollen große Abwasserbehandlungsanlagen zur Treibhausgas- und Energieneutralität verpflichtet werden (Art. 11): Die von ihnen erzeugte erneuerbare Energie muss bis Ende 2045 mindestens ihrem Verbrauch entsprechen. Dieser systemübergreifende Ansatz dürfte im konkreten Einzelfall allerdings schwierig umzusetzen und potenziell mit höheren Kosten verbunden sein, da der Energieverbrauch mit steigender Anforderung an die Reinigung zunimmt und nur begrenzte Kapazitäten zur Erzeugung erneuerbarer Energie bestehen.

Drittens müssen die Mitgliedstaaten laut Art. 20 sicherstellen, dass die Entsorgungswege im Rahmen der Klärschlammbewirtschaftung der Abfallhierarchie gemäß Art. 4 Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) entsprechen, was Abfallvermeidung, die Wiederverwendung und das Recycling von Ressourcen verbessern soll. Der Umsetzung des „Null-Schadstoff-Aktionsplans“ dient auch, viertens, die verpflichtende Einführung der bereits erwähnten vierten Reinigungsstufe, die Mikronährstoffe beseitigen soll (Art. 8). Zusammen mit der Schweiz, die als erste eine verpflichtende vierte Reinigungsstufe eingeführt hat, würde die EU hiermit weltweit eine Vorreiterrolle einnehmen.

2.4.2.4

Wasserwiederverwendungsverordnung

Die Verordnung über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (VO (EU) 2020/741, ABl. L 177 vom 5.6.2020: 32 ff.) strebt eine Kreislaufführung von Wasser an. Sie legt für alle EU-Mitgliedstaaten Mindestanforderungen an die Wasserqualität und -überwachung fest sowie Regeln für das Risikomanagement zur sicheren Verwendung von aufbereitetem Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung im Rahmen eines integrierten Wassermanagements. Sie reagiert damit auf regional auftretende Phasen von Wasserknappheit, die sich mit voranschreitendem Klimawandel verschärfen. Die Verordnung gilt seit dem 26. Juni 2023. Im Rahmen des Risikomanagements (Art. 5) werden die Betreiber von Aufbereitungsanlagen zur Erstellung von Risikomanagementplänen für die Wasserwiederverwendung verpflichtet, die der Genehmigung durch mitgliedstaatliche Behörden bedürfen. Die Anlagenbetreiber ermitteln und bewerten dafür die Gefahren durch die Wiederverwendung und bestimmen geeignete Vorsorgemaßnahmen. Wenngleich die Wasserwiederverwendungsverordnung grundsätzlich zu begrüßen ist, bedarf es weiterer Konkretisierung, damit sie in den Mitgliedstaaten anwendbar ist. So müssen etwa Mindestanforderungen und das Risikomanagement teils von den Mitgliedstaaten (etwa die Ausgestaltung durch das technische Regelwerk DWA M-1200), teils

durch die Kommission in delegierten Rechtsakten geregelt werden. Bei den Mindestanforderungen haben die Mitgliedstaaten einen großen Interpretationsspielraum für die Konkretisierung der Anforderungen für Aufbereitung, Monitoring und Risikomanagement. Dies birgt die Gefahr, dass die mitgliedstaatlichen Standards sehr unterschiedlich ausfallen werden und letztlich zu Vollzugsdefiziten führen könnten (UBA, 2023a).

2.4.3

Selbstorganisierte Wassergovernance

Gerade im Kontext von Fragen natürlicher Ressourcengovernance ist es essenziell, sowohl staatliche Governance (top-down) als auch gelebte Praktiken auf lokaler Ebene (bottom-up) zu verstehen, wenngleich diese Binarität eine Vereinfachung darstellt (Greif, 2006; Mielke et al., 2011; Hodgson, 2006). Während staatliche Governance meist im Fokus von politischen Debatten und sozialwissenschaftlicher Forschung steht, erhalten gelebte Praktiken und informelle Strukturen vergleichsweise geringe Aufmerksamkeit, obwohl sie in der Umsetzung eine zentrale Rolle spielen. Die Auswirkungen gelebter Praktiken bzw. Informalität auf die Wassergovernance sind ambivalent (Sengupta, 1980; Bardhan, 2004; Bjornlund, 2004). Während Erfahrungswissen und Selbstorganisation auf verschiedenen Ebenen der Wassergovernance existieren, können sie je nach Kontext die staatliche Governance ergänzen, z. B. bei traditionellen, selbstorganisierten Bewässerungssystemen, oder ihr entgegenwirken bzw. mit ihr in Konflikt stehen, z. B. beim Diebstahl von Wasser (Helmke und Levitsky, 2004). Ein Risiko selbstorganisierter, informeller Governance ist, dass parallele Machstrukturen staatliches Wassermanagement unterlaufen und hierbei möglicherweise Minderheiten diskriminieren. Beispielsweise hebt in Jordanien die informelle Norm des Wasta, der bevorzugten Behandlung von Mitgliedern des eigenen Klags, häufig die Durchsetzung von Wasserentnahmegebühren aus (Oberhauser et al., 2023). Oftmals können informelle Regeln aber auch für die Wassernutzung oder die Koordinierung bei der Festlegung von Regeln wirksamer sein als staatliche Regeln (Bardhan, 2004: 27). Traditionelle Systeme können so mitunter eine nachhaltigere Wasserversorgung gewährleisten als formelles Wassermanagement, indem sie traditionelle Anbautechniken und damit auch Ökosystemleistungen bewahren. Ein Beispiel hierfür ist die Oasenbewirtschaftung in Nordafrika (Santoro, 2023; Mustapha, 2016). Zweitens können gelebte Praktiken außerhalb des rechtlichen Rahmens zur Anwendung gebracht werden. Insbesondere in Gesellschaften mit leistungsschwachen oder auch unzureichenden staatlichen Institutionen, beispielsweise im Wassermanagement,

übernehmen häufig informelle, nachbarschaftliche oder historisch gewachsene und gelebte Institutionen Aufgaben des Wassermanagements (Bardhan, 2004: 27; Balasubramanya und Buisson, 2022). Schließlich kommt es wiederholt dazu, dass informelle Institutionen, beispielsweise der nachbarschaftsbasierten Organisation, von staatlichen Institutionen aufgegriffen und gefördert werden, beispielsweise im Umgang mit Extremereignissen, Wasserknappheit oder anderen wasserbezogenen Herausforderungen (Bjornlund, 2004).

Vielerorts zu beobachtendes Wassermismanagement basiert auf einer strikten Trennung von staatlich reguliertem und selbstorganisiertem Wassermanagement. Die offiziellen, formellen Politiken funktionieren nicht, wenn sie gelebte Praktiken des Wassermanagements nicht berücksichtigen, adressieren und integrieren. Wie die Untersuchung über einen Ansatz zum partizipativen Grundwassermanagement in Marokko zeigt, hat dieser wegen der Exklusion informeller Strukturen und Machtverhältnisse nicht zu den gewünschten Ergebnissen

geführt (Houdret und Heinz, 2022). Einer der Faktoren für die schwierige Umsetzung des Integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) in Südafrika besteht in der fehlenden Berücksichtigung der Rolle traditioneller Strukturen in der Wassergovernance (Dombrowsky et al., 2022b; Stuart-Hill et al., 2020; Lukat et al., 2022). Das Beispiel Indiens verdeutlicht, dass die Umsetzung des Water-Energy-Food (WEF)-Nexus erschwert wird, wenn sektorale Politiken zu Wasser, Energie und Landwirtschaft sowie unterschiedliche Gesetze auf föderaler und einzelstaatlicher Ebene teilweise im Widerspruch zu informellen Normen stehen (Beisheim, 2013: 56). Als Element eines analytischen Rahmens für den WEF(E)-Nexus wird aus diesem Grund vorgeschlagen, sowohl formelle als auch informelle Institutionen zu berücksichtigen (Srigiri und Dombrowsky, 2021: 56). Neu-Delhi weist beispielsweise eine sehr fragmentierte Wasserinfrastruktur mit geringer Reichweite öffentlicher Infrastruktur auf, die ungeplante, informelle Infrastruktur zur Norm macht, u. a. bei der Wasserversorgung und Sanitäranlagen. Diese

Kasten 2.2-3

Partizipative Governance und intermediäre Strukturen bei der Umsetzung der EU-Wasser-rahmenrichtlinie: Beispiele Schweden und Deutschland

Das Zusammenspiel eines gestaltenden Staats mit lokalen Strukturen ist bei der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie ein zentrales Element. Neben ihren Umweltzielen, einen guten ökologischen und chemischen Zustand aller Wasserkörper der EU zu erreichen, beinhaltet sie auch die Anforderung an Mitgliedstaaten, Betroffene und Stakeholder auf lokaler Ebene aktiv zu beteiligen. Dafür gibt es einen formalisierten dreistufigen Prozess, dessen Verfahren und Kriterien für Mitglieder festgelegt sind, sowie einen informellen Prozess, dessen Umsetzung sich durch einen Ermessensspielraum bezüglich des Formats und der einbezogenen Akteure auszeichnet (Art. 14). Bisherige Erfahrungen zeigen, dass Beteiligung und „intermediäre Organisationen“, z. B. Netzwerke und Partnerschaften, ein Potenzial haben, lokales Wissen und Verständigung zu fördern (Moss, 2009).

Ein Beispiel für eine solche Schnittstelle im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind die lokalen Wasserbehörden (Water Boards) in Schweden. Sie förderten den Dialog innerhalb eines Wasserbezirks, waren beteiligt am Sammeln von lokalem Wissen und boten ein Forum für Diskussionen über die aktuelle und zukünftige Wassernutzung (Söderberg, 2016). Durch die 125 lokalen Wasserbehörden wurde die gelebte Praxis und das Erfahrungswissen von Akteuren, wie z. B. Mitgliedern des indigenen Sami-Volks in Nordskandinavien, aber auch von etablierten Interessensgruppen wie z. B. der Fischereiorganisation und Gemeinden aufgenommen. In unterschiedlichen Fallanalysen zur EU-Wasserrahmenrichtlinie stellten Forscher:innen fest, dass die Einbeziehung betroffener und interessierter Akteure

dazu geführt hat, dass bereits gut organisierte Interessen den Prozess dominierten. Zum Beispiel hatten die Fischereiorganisationen mehr Einfluss als die samischen Vertreter:innen (Söderberg, 2016). Eine Befragung der Wasserbehörden der damals sechs größten EU-Länder (Frankreich, Deutschland, Italien, Polen, Spanien und Großbritannien) zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie und Beteiligung ergab, dass staatliche Behörden, die Landwirtschaft sowie Umweltschutzverbände am stärksten repräsentiert waren. Der Einfluss der Landwirtschaft und Industrie wurde insbesondere in Frankreich und Deutschland als zu hoch wahrgenommen (Rimmert et al., 2020). In Deutschland hat die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie ebenfalls Beteiligungsstrukturen etabliert sowie Beteiligung und Lernprozesse angestoßen. Ein Beispiel auf lokaler Ebene umfasste drei interaktive Workshops, die durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie motiviert wurden. Hier kamen staatliche und nicht staatliche Akteure zusammen, um über den Abfluss eines Staudamms zu diskutieren. Die Studie kam zu dem Schluss, dass ein wirksamer Partizipationsprozess sowohl einen formalen Rahmen braucht, als auch flexibel in der Ausgestaltung sein sollte, um Experimente und Lernen zu beschleunigen. Er sollte zudem in Managementstrukturen verankert sein, damit die Ergebnisse des Prozesses einen Einfluss auf zukünftige Managemententscheidungen haben können (Moellenkamp et al., 2010).

Für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist die Verwaltung und Überwachung der aktuellen Wasserqualität und -quantität zentral. Ein Beispiel aus Unterfranken zeigt, dass jedoch selbst in Deutschland vielerorts nicht erfasst wird, wie viel Wasser jeweils entnommen wird, da die Entnahme durch die Landwirtschaft oder private Brunnen oft auf dem Prinzip der Eigenverantwortung beruht. Dies deutet darauf hin, dass Wasserentnahmen selbst in stark formalisierten institutionellen Kontexten von Fall zu Fall unterschiedlich flexibel gehandhabt werden (Kohler et al., 2023).

vermeintlichen Grenzen zwischen Staat und Gesellschaft werden aber von den in informellen Siedlungen lebenden Menschen nicht als solche wahrgenommen. Infrastruktur ist hier vielmehr das Ergebnis einer hybriden Form infrastruktureller Macht (Truelove, 2021), d. h. dass es ein dynamisches, alltägliches Zusammenspiel staatlicher und selbstorganisierter Formen der (diskursiven) Steuerung von Wasserinfrastruktur gibt.

Als ein wichtiger Bestandteil adaptiven Wasserressourcenmanagements umfasst soziales Lernen nicht nur formelle, sondern auch informelle Strukturen, in denen unterschiedliche Akteure zusammenarbeiten. Formelle und informelle Institutionen können sowohl effektiv als auch ineffektiv für die Anpassung des Wasserressourcenmanagements sein (Pahl-Wostl et al., 2007).

Informelle Praktiken spielen in Ländern mit hohem Einkommen eine weniger wichtige Rolle als in Ländern Südasiens, Lateinamerikas und Afrikas, was auf die starke staatliche Kontrolle und Regulierung der öffentlichen Wasserversorgung zurückzuführen ist. Auch wenn es wichtig ist zu betonen, dass Wassergovernance in Mittel- und Niedrigeinkommensländern meist informell funktioniert, bedeutet dies nicht, dass es in den Hoch-einkommensländern keine gelebten Praktiken gibt.

2.4.4

Wassergovernance an ihren Grenzen

Wasserknappheit durch Übernutzung, Klimawandelfolgen und Wasserverschmutzung sind zentrale Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Sie verursachen bereits jetzt Konflikte, Migration und Vertreibung, bieten jedoch auch Chancen für multilaterale Kooperation. Die politische und rechtliche Reaktion darauf erfolgt bisher meist durch nationales oder regionales Wassermanagement, das inhaltlich stark diversifiziert und dessen Umsetzung häufig durch fragmentierte Zuständigkeiten geprägt ist. Auf globaler Ebene gewinnt Wassergovernance zunehmend an Bedeutung, wie die UN-Wasserkonferenzen 2023, 2026 und 2028 zeigen – die langfristige Entwicklung dieser wichtigen Prozesse ist jedoch noch ungewiss (Kap. 8.1). Zudem spielt Wasser in verwandten Politikbereichen, z. B. Klima- und Biodiversitätsgovernance, eine wichtige Rolle. Der steigende Koordinationsaufwand und die Identifikation von Synergien an den Schnittstellen ist jedoch eine Herausforderung.

Das bisherige Nutzungsregime auf der staatlichen Ebene zielt auf die Steuerung separater Bereiche, wie Industrie, Landwirtschaft, Haushalte sowie die Bereiche Wasserver- und -entsorgung.

Ein grenzüberschreitendes, klimaresilientes Wassermanagement, das systemisch sämtliche Wasserkörper in den Blick nimmt und zugleich auf eine Qualitäts- und

Quantitätsverbesserung sowie gerechte Verteilung von Wasser zielt, fehlt weitgehend. Gute Ansätze sind zwar vorhanden (IWRM, EU-Wasserrahmenrichtlinie, Zero Pollution), es mangelt jedoch an deren effektiver Umsetzung. Drei Elemente sind besonders vielversprechend, um die Umsetzung zukünftig effektiver zu gestalten: Koordination, Teilhabe und Anpassungsfähigkeit (GWP, 1996).

2.4.4.1

Koordination

Eine enge, Sektoren und Steuerungsebenen übergreifende Koordination sowie die Koordination mit der Klima- und Biodiversitätsgovernance ist ausschlaggebend. Dabei zeigt die neuere Wassergovernanceforschung, dass dies eher gelingt, wenn hierarchische, marktförmige und netzwerkförmige Steuerungsansätze und Koordinationsmechanismen gleichzeitig zum Tragen kommen und neben staatlichen auch Formen selbstorganisierter Governance hinreichend berücksichtigt werden (Lukat et al., 2023). Steuerungsebenen übergreifende Koordination in vertikal hierarchisch und zentralisierten Systemen gestaltet sich anders als in dezentralen, polyzentrischen Systemen (Pahl-Wostl und Knieper, 2023). International koordinierte Governance könnte entlang von Lieferketten entstehen (virtuelles Wasser; spillover). Wasserknappheiten und -verschmutzungen entlang von Lieferketten werden bislang kaum bzw. nicht adressiert. Neuartige, punktuelle Instrumente – etwa eine Herstellerverantwortung und -haftung, wie sie die reformierte EU-Kommunalabwasser-richtlinie enthält – oder Ansätze zur Wiederverwendung von Wasser (EU-Wiederverwendungsverordnung) sind zwar teilweise rechtlich verankert, ihre Wirksamkeit ist bislang jedoch unzureichend erforscht.

2.4.4.2

Teilhabe

Teilhabe reicht von rein informativer Beteiligung bis hin zum harten Aushandeln unterschiedlicher Interessen von Umweltverbänden und Wirtschaftsakteuren. Auch ist Wassermanagement in hohem Maß von einem Zusammenspiel staatlicher und selbstorganisierter Governance geprägt. Letztere bezeichnet die alltäglich gelebte, häufig auch informelle, nachbarschaftlich organisierte Wassermanagementpraxis, beispielsweise in kleinbäuerlichen Kontexten. So erfordert Integriertes Wasserressourcenmanagement stets die Operationalisierung auf regionaler, nationaler bzw. lokaler Ebene sowie die weitere Ausgestaltung der regulativen Rahmenbedingungen, um diese Mehrebenenintegration zu fördern (Ibisch et al., 2016a). Voraussetzung hierfür sind befördernde Institutionen und Traditionen des partizipativen Managements, technische Infrastrukturen und Wassermanagementebenen, die es erlauben, Wasser entlang lokaler Bedarfe und mit einem hohen Vertrauen der Wassernutzer:innen in das System

bezüglich künftiger Wasserverfügbarkeit zu managen (Hornidge et al., 2011). Die politische Ökonomie von Teilhabe und ihre „Gewinner“ und „Verlierer“ sind entscheidend für die Ausgestaltung der unterschiedlichen Wassermanagementansätze. Konkurrierende Interessen sollten daher – im Sinne eines Leitbilds für nachhaltiges und sozial ausgewogenes, zukunftsfähiges Wassermanagement, transparent und für alle Nutzergruppen – nachvollziehbar gestaltet werden.

2.4.4.3

Anpassungsfähigkeit

Schließlich fehlt es auch an einem adaptiven und langfristigen Management von Wasserressourcen. So verwundert es nicht, dass Wassernotlagen (Kap. 4) bislang kaum präventiv adressiert werden. Die Anpassungsfähigkeit und Agilität der Systeme im Umgang mit sich klima- und umweltwandelbedingt häufenden Notständen in Bezug auf (plötzlichen) Wasserüberfluss und -knappheiten hängt von der Qualität der technologischen Infrastrukturen, Personalkapazitäten, Kommunikationssystemen und Bewusstseinsbildung in den Gesellschaften selbst ab. Einschließungseffekte (Lock-ins) und Pfadabhängigkeiten erschweren die Anpassung, da sie die Flexibilität

in Planungs- und Entscheidungsprozessen einschränken (Kasten 2.4-4). Es mangelt bisher an Strukturen, um Wassergovernanceprozesse auf globaler, regionaler und lokaler Ebene wissenschaftlich zu informieren sowie fortlaufend empirisch zu überprüfen.

Insgesamt ist die bisherige Wassergovernance zu fragmentiert, nicht sozial ausgewogen gestaltet sowie auf zukünftige Wassernotlagen aufgrund eines fehlenden adaptiven und langfristigen Managements nicht adäquat vorbereitet.

2.5

Investitionsbedarf und Finanzierungsherausforderungen

Sowohl in Hoheinkommensländern als auch in Niedrigeinkommensländern besteht eine massive Finanzierungslücke bei der Bereitstellung und der Erhaltung von Wasserinfrastruktur. Auf der Grundlage eines breiten Spektrums an Kostenschätzungen für wasserbezogene Infrastrukturen (WWC und OECD, 2015) schätzt die Weltbank die globale Finanzierungslücke auf 6.700 Mrd. US-\$ bis 2030 und 22.600 Mrd. US-\$ bis 2050 (Khemka et al.,

Kasten 2.4-4

Wasserbezogene Pfadabhängigkeiten und Lock-ins

Von Pfadabhängigkeiten spricht man dort, wo – aus unterschiedlichen Gründen – Festlegungen, Erfahrungen oder Ereignisse in der Vergangenheit heutige Entscheidungen und Entscheidungsmöglichkeiten beeinflussen. Ein Lock-in repräsentiert eine Verfestigung von historischen Strukturen, welche Wandel verlangsamt oder erschwert (Goldstein et al., 2023; Helmrich et al., 2023; Unruh, 2000). Dies kann technologische, infrastrukturelle, institutionelle oder auch verhaltensbezogene Gründe haben und sich positiv oder auch negativ auf den Umgang mit Wasser und Wassergovernance auswirken. Infrastrukturelle Lock-ins ergeben sich beispielsweise durch sinkende Durchschnittskosten aufgrund steigender Skalenerträge kapitalintensiver Wasserinfrastrukturen (Seto et al., 2016; Kap. 2.5.1). Institutionelle Lock-ins können aus verfestigten Governancestrukturen entstehen (Pierson, 2000; Seijger et al., 2017). Ein institutioneller Lock-in auf globaler Ebene ergibt sich beispielsweise aus der starken Fragmentierung von Wassergovernance. Darüber hinaus existieren diskursive Lock-ins, wie z. B. die Priorisierung von Effizienz über Gerechtigkeit in wasserpolitischen Argumentationen (Boelens und Vos, 2012; GCEW, 2023b; Meehan et al., 2023).

Aber auch verhaltensbezogene Pfadabhängigkeiten und Lock-ins, die ihre Wurzel in sozialen Strukturen oder Normen haben, beeinflussen Wassergovernance und deren Ergebnisse erheblich (GCEW, 2023b; Nhim und Richter, 2022). Verhaltens-effekte wie z. B. Gewöhnung, Routinen und Risikovermeidung

können dazu führen, dass Planungs- und Governanceprozesse in bisherigen Denkmustern verhaftet sind und neuen Herausforderungen nicht gerecht werden (Simoens et al., 2022).

Pfadabhängigkeiten können allerdings auch positiver Natur sein. So kann Erfahrungswissen im Umgang mit Wasser, beispielsweise indigener Gemeinschaften, Pfadabhängigkeiten in einem positiven Sinne hervorrufen. Viele indigene Völker, z. B. die Anishinaabek in Kanada, haben einen spirituellen Bezug zu Wasser und handlungsleitende moralische Prinzipien, die sich am Wohlbefinden für Menschen und Gewässer orientieren (Taylor et al., 2019). Anstatt den Einbezug dieser unterschiedlichen Wissensformen als Chance zu sehen, bisherige Verhaltensweisen zu reflektieren und weiterzuentwickeln, werden diese seitens einflussreicher Wassergovernanceakteure (OECD, UN, Weltbank) allerdings oft nicht ausreichend verstanden bzw. einbezogen, was Ungleichheiten verfestigt und Gefahren von Missmanagement erhöht (GCEW, 2023b). Die Einbeziehung dieses Erfahrungswissens könnte einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, die Qualität von Wassermanagement zu verbessern und Risiken zukünftig besser zu managen (GCEW, 2023b). Positive Pfadabhängigkeiten können sich auch aus kollektiv erarbeiteten Regeln für Wassermanagement ergeben (Abarzúa und Glückler, 2023; Ostrom und Gardner, 1993).

Negativ wirken sich aus Sicht von Expert:innen oft verfestigte Denkmuster aus, die implizieren, dass Lösungen für Wasserprobleme möglichst zentralisiert und großskalig sein sollten (Gerten, 2018). Verhaltensbasierte Pfadabhängigkeiten resultieren aber auch aus Widerständen gegen Veränderung, wenn einflussreiche Akteure von etablierten Systemen profitieren, ihre Interessen verteidigen und dadurch auch gesellschaftlich vorteilhaften Wandel verhindern.

2023). Allein für das Erreichen der SDG-Ziele im Bereich WASH fehlen in den von der Weltbank betrachteten 140 Ländern im Zeitraum 2017–2030 jährlich geschätzt 114 Mrd. US-\$ oder 0,39 % des Bruttoinlandsprodukts dieser Länder (Hutton und Varughese, 2016).

Preisinstrumente können einen wichtigen Beitrag zur Finanzierung der Infrastruktur zur Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung und zur Deckung lokaler Wasserbedarfe leisten, indem sie Einnahmen generieren und Kosten umverteilen (Grafton et al., 2023). Allerdings stehen der Preis für Wasser und der Wert von Wasser in vielen Ländern in keinem angemessenen Verhältnis (UN Water, 2021). Wasserpreise und Verbraucherkosten spiegeln reale Knappheitsbedingungen, externalisierte Kosten aus Umwelt- und Ökosystemschäden sowie Bereitstellungskosten bisher meist unzureichend wider (Grafton et al., 2023; Damania, 2020).

2.5.1 Wasserinfrastrukturinvestitionen

Investitionen in die Wasserinfrastruktur sind zentral, um eine stabile und dauerhafte Wasserversorgung sicherzustellen. Zu finanzierende Maßnahmen betreffen alle Stufen des Nutzungskreislaufs (Dargebot, Bereitstellung, Verteilung, Aufbereitung). Dazu zählen Maßnahmen zur Erhaltung von Oberflächengewässern, zum Aufbau und Betrieb einer Speicherungs- und Transportinfrastruktur (z. B. Reservoirs, Pipelines, Kanäle), zur sanitären Versorgung, Abwassersammlung und Behandlung, zum Anschluss an Haushalte und landwirtschaftliche Verbraucher, zum Hochwasserschutz sowie für Abflussvorkehrungen an versiegelten Flächen (OECD, 2022a).

Die über viele Generationen favorisierten Lösungen einer zentralen Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung haben in vielen Ländern durch lange Planungs- und Abschreibungszeiträume beträchtliche Finanzmittel gebunden (BMUB, 2017). Aufgrund unsicherer Planungsbedingungen und bisher nicht getätigten Instandhaltungen besteht in diesen Sektoren ein erheblicher Investitionsstau, der zunehmend in technischen Ausfällen und wachsenden Belastungen für die Umwelt resultiert (EIB, 2023a). Dort wo sich die Randbedingungen der Planung durch Bevölkerungswachstum und demographische Veränderungen und durch die Auswirkungen des Klimawandels verschieben, bestehen jedoch Widerstände, von bisherigen Lösungsansätzen abzurücken, wodurch ressourcenintensive Infrastrukturösungen weiter favorisiert werden (Kasten 2.4–4).

Bisher erfolgt die Finanzierung wasserbezogener Infrastruktur überwiegend aus öffentlichen Mitteln oder über Nutzungsentgelte bzw. Gebühren sowie durch internationale Finanzinstitute. Doch auf den Wassersektor

entfielen zwischen 2009 und 2020 weniger als 2 % der gesamten öffentlichen Ausgaben. Dies deckt nur einen Bruchteil der Finanzierungsbedarfe in einigen Regionen. So wären in Subsahara-Afrika zwischen 2017 und 2030 Ausgaben von über 4 % des BIP notwendig, um Zugang zu sauberem Wasser und Abwasserversorgung für alle zu erreichen (Khemka et al., 2023).

Privates Kapital kann helfen, die Finanzierungslücken im Wassersektor zu schließen (Khemka et al., 2023; OECD, 2022a). Eine stärkere Einbeziehung des privaten Sektors wird jedoch oft skeptisch gesehen (Khemka et al., 2023). Grund hierfür sind Beispiele aus der Vergangenheit, in denen die vollständige Auslagerung der Aufgaben der öffentlichen Daseinsvorsorge auf den privaten Sektor negative soziale und ökologische Folgen hatte (Heller et al., 2023; Bayliss, 2014). Mit der Privatisierung öffentlicher Unternehmen, insbesondere in angelsächsischen Ländern in den 1980ern, verknüpften einige Regierungen die Hoffnung, eine zuverlässige Wasserinfrastruktur zu geringeren Kosten aufzubauen und finanzieren. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Privatisierung der Wasserversorgung zum Teil zu hoher Verschuldung der betroffenen Konzerne und hohen Verbraucherkosten führte (Thames Water, Großbritannien; Laville et al., 2023). Gleichwohl nennt eine Studie der Weltbank auch Beispiele für gelungene Beteiligung privater Akteure (Khemka et al., 2023: 57 ff.), z. B. das Guerdone Bewässerungsprojekt in Marokko, in welchem ein Konsortium auf der Grundlage einer dreißigjährigen Konzession Bewässerungsinfrastruktur für Zitronenfarmen aufbaute, kofinanzierte und für die Dauer der Konzession betreibt.

Allerdings ist der Wassersektor für private Investoren wenig attraktiv. Ein Grund hierfür sind geringe und instabile Erträge, unter anderem aufgrund einer unzureichenden Einpreisung des Wertes von Wasser (Kap. 2.5.2) und schwer quantifizierbarer und monetarisierbarer Nutzen, z. B. in Verbindung mit naturbasierten Lösungen (Khemka et al., 2023; OECD, 2022a; Kap. 6.1, 8.3.2). Auch berücksichtigen private Unternehmen Risiken durch Wassermangel oder wasserbezogene Extremereignisse wie Überschwemmungen für das eigene Geschäftsfeld noch zu wenig und unterschätzen daher den Nutzen, auch selbst in die Erhaltung und nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen zu investieren (Kap. 8.3.1).

Neben geringen und instabilen Erträgen mindern die Notwendigkeit hoher Anfangsinvestitionen verbunden mit langen Rückzahlungsperioden für klassische Wasserinfrastruktur, mangelnde Kreditwürdigkeit von deren Betreibern und das Fehlen förderlicher politischer, institutioneller und rechtlicher Rahmenbedingungen die Anreize für private Investitionen (Khemka et al., 2023; OECD, 2022a).

Daneben gibt es weitere Gründe, warum Investoren und Projekte schwer zusammenfinden (OECD, 2022a; Kap. 8.3.3). Viele wasserbezogene Projekte werden auf lokaler Ebene umgesetzt und sind klein und kontextspezifisch, während Investoren aufgrund der geringeren Transaktionskosten größere Projekte bevorzugen. Auch fehlt es Investoren oft an Wissen über den Wassersektor und Methoden und Daten, um Risiken zu erfassen und Projekte zu bewerten, während Akteure im Wassersektor Schwierigkeiten haben, Projekte zu entwickeln, welche den Anforderungen von Investoren genügen.

Neben der Finanzierungslücke für Bereitstellung und Unterhalt von Wasserinfrastruktur ist ein weiteres Problem in vielen Ländern die ineffiziente Nutzung vorhandener Finanzmittel (Khemka et al., 2023; UNEP, 2021b). Diese erreichen nicht unbedingt die Projekte mit den größten Nutzen (Laubenstein et al., 2023). Die mangelnde Effizienz kann verschiedene Ursachen haben, z. B. fehlende Koordination zwischen Akteuren, mangelnde Transparenz oder unzureichende Buchhaltung oder Korruption (UNEP, 2021b). Als ein Beispiel nennen Laubenstein et al. (2023) fehlgeleitete Subventionen im Bereich Wasser- und Abwasserversorgung (Andres et al., 2019; UNESCO, 2021). Auch technische, institutionelle oder soziale Pfadabhängigkeiten können eine effiziente Nutzung vorhandener Mittel behindern.

Die Unterfinanzierung von Wasserinfrastrukturen hat negative gesundheitliche Folgen für die Gesellschaft aufgrund schlechter Trinkwasserqualität, fehlendem Zugang zu sanitären Einrichtungen und mangelnder Abwasserentsorgung (Kap. 2.3.4). Wasserknappheit sowie wasserbedingte Extremereignisse gefährden auch Wachstum und Entwicklung, insbesondere, in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens (Kap. 3.2.1.3). Ein Umsteuern ist daher dringend erforderlich (Kap. 8.3).

2.5.2

Wasserpreise und Steuerungsinstrumente

Preisinstrumente wie Wasserentnahmeentgelte und Trinkwasser- oder Abwassergebühren sind das Rückgrat der Gewässerbewirtschaftung der meisten Länder weltweit. Wasserpreise, die den Wert von Wasser nicht widerspiegeln und externalisierte Kosten nicht berücksichtigen, z. B. durch Ökosystemschäden infolge von Übernutzung, begünstigen hohe Verbräuche und ineffiziente Nutzungsformen (Das et al., 2022) und bedrohen die Finanzierung essenzieller Infrastrukturen. Die Höhe des Wasserpreises, den Verbraucher für Wasser oder wasserintensive Güter bezahlen, wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, darunter die Kosten zur Förderung und Aufbereitung von Wasser, zum Betrieb von Verteilnetzen und -anschlüssen, Preiselemente wie

Steuern, Gebühren und Beiträge sowie die Zahlungsbereitschaft privater Akteure. In der EU sind nach der Wasserrahmenrichtlinie (Kap. 2.4.2.2) Wassertarife kostendeckend im Hinblick auf Bereitstellung und Betrieb der notwendigen Infrastruktur und nachhaltig im Hinblick auf die Berücksichtigung von externalisierten Kosten (z. B. Umweltfolgen) auszugestalten. Es sollen Anreize für eine effiziente Nutzung von Wasserressourcen gesetzt werden. Kostendeckung soll auch umwelt- und ressourcenbezogene Kosten einschließen (Berbel und Expósito, 2020).

In vielen Ländern der EU sowie in zahlreichen Niedrigeinkommensländern und auch Hocheinkommensländern weltweit wird eine solche Kostendeckung bisher nicht erreicht. Besonders gering ist sie für den Betrieb der Bewässerungsinfrastruktur in der Landwirtschaft. Laut OECD (2022a) erreichen nur neun von 39 Ländern eine vollständige Kostendeckung sowohl bei den Kapitalkosten als auch bei Betrieb und Wartung für die Bewässerung.

Zu den Hemmnissen bei der Implementierung höherer Preise zählen politische und ökonomische Barrieren (z. B. Widerstand einflussreicher Industrien, Korruption), institutionelle Hürden (z. B. Zuteilung von Wasserrechten), administrative Hemmnisse (z. B. Ausstattung von Behörden, Überwachung und rechtliche Durchsetzung), technische und methodische Probleme (z. B. fehlendes Metering für Entnahmen, unklare Erfassung nicht monetärer Kosten und Nutzen) oder auch soziale Überlegungen (z. B. Belastung einkommensschwacher Haushalte oder Betriebe bei fehlenden Ausgleichs- und Anpassungsmaßnahmen).

So wird eine angemessene Bepreisung von Wasser nicht zuletzt dadurch erschwert, dass sie zu ungewollten Preissteigerungen (z. B. bei Lebensmitteln) aber auch zu strukturellem Wandel führen kann, der die Lebensgrundlage Betroffener gefährden könnte und damit nicht nur wirtschaftliche, sondern auch gesellschaftliche Konsequenzen hat. Zu beobachten ist, dass die Produktivität und Wertschöpfung aus der Nutzung von Wasser über verschiedene Wirtschaftszweige und Regionen hinweg sehr unterschiedlich ist. Laut UN Water (2021) lag die nach Einkommen gemessene Produktivität der Wassernutzung 2019 beispielsweise in landwirtschaftlich geprägten Niedrigeinkommensländern bei 3 US-\$ pro m³, in dienstleistungsbasierten Volkswirtschaften hingegen bei über 50 US-\$ pro m³. Sofern diese Unterschiede auf unterschiedliche Produktivität der Wassernutzung zurückzuführen sind (z. B. durch veraltete Technologien), kann eine höhere Bepreisung die Wettbewerbsfähigkeit betroffener Betriebe reduzieren und ihre Existenz gefährden. Die Diskussion um die Bepreisung der Wassernutzung muss entsprechend immer eingebunden sein in eine Diskussion um die Abfederung damit einhergehender Härten, statt einfach auf die Bepreisung von Wasser zu verzichten (Kap. 8.3.2).

In vielen Ländern gelten allerdings Ausnahmen oder Vergünstigungen der regulären Tarife für bestimmte wirtschaftliche Nutzungen, wodurch Anreize für Wassereinsparungen gemindert werden. Insbesondere ist hier die Landwirtschaft zu nennen, die in nur 44 % der in einer Studie der OECD (2021) betrachteten Länder mit Entgelten für Wasserentnahmen belegt wird. In Deutschland entfallen fast 80 % der Wasserentnahmen auf Energieerzeugung, verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Landwirtschaft. Trotzdem gelten teilweise keine oder geringe Entgelte für diese Wirtschaftszweige. Die Festlegung der Entgelte ist Sache der Länder. Bayern, Hessen und Thüringen erheben generell keine Entnahmeentgelte. Dort wo sie erhoben werden, variiert ihre Höhe stark (0,5–31 ct pro m³; BUND, 2019).

Herausforderungen für die Durchsetzung höherer Preise ergeben sich vor allem in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens auch durch institutionelle und technische Voraussetzungen. Einer Umfrage der Weltbank zufolge lag in Usbekistan die Zahlungsbereitschaft für eine gesicherte und qualitativ gute Wasserversorgung bei Haushalten, die nicht an ein Wassernetz angeschlossen waren, beim Doppelten der existierenden Tarife. Allerdings kann eine solche Versorgung oft noch nicht gewährleistet werden. Auch fehlende technologische Ausstattung erschwert eine Preisreform: So verfügt Usbekistan nicht über ein flächendeckendes Metering für den Wasserverbrauch von Haushalten (World Bank, 2016b). In Deutschland steht eine mangelnde Erfassung von Wasserentnahmen in der Landwirtschaft der Durchsetzung von Entnahmeentgelten oft im Weg (Kap. 6.3, 8.3).

Über die Finanzierungsfunktion hinaus haben Wasserpreise in vielen Ländern eine Lenkungsfunktion, um sparsames Handeln der Verbraucher zu fördern, negative Umweltauswirkungen zu begrenzen und Gewässerschutzmaßnahmen zu finanzieren. Dies gilt für Hoheinkommensländer, z.B. in der EU, aber auch für Niedrigeinkommensländer, z.B. Tadschikistan, das 2009 eine Gebühr für stromproduzierende Unternehmen im Bereich Wasserkraft einführte, um Renditen aus der Nutzung von natürlichen Ressourcen zu besteuern (OECD, 2018).

Durch die Kopplung von Produktion und Wasserverbrauch in wasserintensiven Wirtschaftszweigen, wie der Landwirtschaft und Teilen des Energiesektors, können punktuelle Sparanreize von Wassergebühren durch produktionsfördernde Maßnahmen untergraben werden, etwa durch Subventionen im Energiesektor. So sank nach einer Erhöhung der Wasserentnahmeentgelte im Energie- und Industriesektor 2012 in Bulgarien zwar der Verbrauch in einigen Sektoren, zugleich stiegen jedoch die Entnahmen für die thermische Kühlung und Wasserkraftnutzung infolge von Subventionen zur Stromproduktion (Sharkov, 2022). Die GCEW (2023a) schätzt die Höhe

von Subventionen, die einer Minderung des Wasserverbrauchs entgegenlaufen, global auf 700 Mrd. US- $\text{\$}$.

Preiswirksame Instrumente werden im Wassersektor durch ordnungsrechtliche Maßnahmen ergänzt, insbesondere um die Wasserqualität zu erhalten. So machen die meisten Industrieländer Vorgaben, unter welchen Bedingungen Grauwasser in den Kreislauf zurückgeführt werden darf (OECD, 2021). Abwasserabgaben auf die eingeleitete Menge oder Schadstofffracht setzen zusätzliche Anreize, um stoffliche Belastungen zu minimieren und eine Wiederverwendung, z. B. für Bewässerungszwecke, zu ermöglichen.

Ordnungsrechtliche Maßnahmen sind auch erforderlich, um die Grenzen der Wirksamkeit preisorientierter Instrumente auszugleichen, beispielsweise zur Begrenzung von Verbrauchs- oder Verschmutzungsmengen. In Zeiten starker Verknappung wurden unter anderem in Frankreich oder Japan in der Vergangenheit Nutzungseinschränkungen für bestimmte Zwecke verhängt, z.B. Verbote für Autowäsche, Gartenbewässerung oder das Befüllen privater Schwimmbecken, um die Grundbedarfe anderer Verbraucher zu sichern (OECD, 2021).

Um eine kosteneffiziente und nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen dauerhaft sicherzustellen, setzen einige Länder und Regionen auf eine lokale Begrenzung des Verbrauchs und den Aufbau von Wassermärkten, auf denen private Akteure wie z. B. Landwirt:innen Wasserentnahmerechte handeln können, ähnlich dem europäischen Emissionshandel. Erfahrungen aus dem australischen Murray-Darling-Becken zeigen, dass Wassermärkte das Potenzial haben, die Effizienz der Wassernutzung zu erhöhen, die Finanzierung der erforderlichen Infrastrukturen sicherzustellen und den Verbrauch im Einklang mit den Ökosystembedarfen zu begrenzen (z. B. Wheeler et al., 2020). Angesichts der hohen erforderlichen institutionellen, rechtlichen und technischen Voraussetzungen ist die Einführung von Wassermärkten für viele Länder allerdings schwierig (Meran et al., 2021b; Kap. 5.1.1).



Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

3

Der fortschreitende Klimawandel verursacht Extremereignisse, deren Intensität und Häufigkeit über bisherige Erfahrungen hinausgehen. Erwärmung und Dürren zusammen mit steigender Verschmutzung führen Gesellschaften und Ökosysteme durch reduzierte Wasserdargebote bei schlechterer Qualität und steigender Nutzung an die Grenzen der Anpassungsfähigkeit. Zudem schwächen Armut, soziale Ungleichheiten, geopolitische Spannungen und Autokratisierung die Widerstandsfähigkeit von Gesellschaften. Dies spiegelt die Grenzen der Beherrschbarkeit und die Dringlichkeit eines klimaresilienten Wassermanagements.

Schon heute gibt es vielfach zu viel, zu wenig, zu verschmutztes Wasser sowie zunehmende Ungerechtigkeiten in der Verteilung des Wassers (Kap. 2). Menschheit, Ökosysteme und der Planet bewegen sich in eine Zukunft, in der die für Mensch und Natur verfügbaren Wassermengen und Wasserqualitäten einem zunehmenden Wandel unterliegen. Das vorliegende Kapitel widmet sich den Verschärfungen in Bezug auf die globale Wassersituation, mit denen Mensch und Natur künftig zu rechnen haben.

Der WBGU verwendet den Begriff Verschärfungen für regionale oder globale Entwicklungen der Wasser-
verfügbarkeit und Wasserverteilung sowie von Extremereignissen und der Wasserqualität, durch die sich wasserbezogene Probleme deutlich verschlechtern. Treiber der Verschärfungen können z. B. der Klimawandel, Landnutzungsänderungen und Ökosystemdegradation, Verschmutzung und steigender menschlicher Nutzungsdruck auf Wasserressourcen oder schwer kontrollierbare Schiefagen durch geopolitische Destabilisierungen sein. Verschärfungen können abhängig von regionalen Kontexten zu Wassernotlagen führen, die weltweit zunehmend auftreten (planetare Dimension; Kap. 4), bis hin zu Situationen, in denen Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden (Kap. 5). Wasser ist in diesem Sinne die gemeinsame „Währung“ vieler globaler Entwicklungen sowie der sich gegenseitig verstärkenden Umwelt- und Gesundheitskrisen (Abb. 3-1; Kap. 3.4).

Die fortschreitende Erwärmung treibt globale und regionale Veränderungen von Niederschlag und Verdunstung voran, verschiebt das Gleichgewicht von gefrorenem zu flüssigem Wasser, erhöht den Wassergehalt in der Atmosphäre und führt zu einer Zunahme von Extremereignissen wie Überflutungen oder Dürren (Kap. 3.1.1). Infrastrukturen sind auf diese Veränderungen nicht vorbereitet (Kap. 3.1.2). Auch die Wasserqualität wird zukünftig weiter abnehmen, sofern die Einleitungen unzureichend geklärter Abwässer – aktuell betrifft dies etwa 80 % der weltweiten Abwässer – und damit von Krankheitserregern, schwer abbaubaren Chemikalien, Nährstoffen und festen Abfälle fortgesetzt werden. Dadurch werden Grundwasser, viele Süßgewässer, Küstenzonen und Meere für Tiere und Pflanzen zum Teil durch Sauerstoffmangel und Giftblüten unbewohnbar (dead zones); die Selbstreinigungskraft der Gewässer geht verloren (Kap. 3.1.3). Künftig wird zudem ohne wirksame Gegenmaßnahmen je nach Region die Wassernutzung und damit die Gefahr der Übernutzung weiter steigen. Globale geopolitische und gesellschaftliche Entwicklungen kommen verschärfend hinzu (Kap. 3.2). Resultat dieser zusammenwirkenden Verschärfungen sind direkte Belastungen der Gesundheit von Natur und Mensch (Kap. 3.3).

3.1 Verschärfungen durch Klimawandel und Verschmutzung

Klimawandel und Wasserverschmutzung werden in Zukunft weiter zunehmen und ohne wirksame Gegenmaßnahmen die ausreichende Versorgung von Natur und Mensch mit Wasser genießbarer Qualität erheblich gefährden.

3.1.1 Fortschreitende Auswirkungen des Klimawandels auf den globalen Wasserkreislauf

Bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat der Klimawandel zu Veränderungen im globalen Wasserkreislauf geführt (Kap. 2.2). Abhängig davon, ob und inwieweit es der Weltgemeinschaft gelingt, die 2015 in Paris vereinbarten Ziele zur Begrenzung des Klimawandels umzusetzen, werden sich diese Veränderungen weiter verstärken und in jeder Region manifestieren (IPCC, 2023b).

3.1.1.1

Veränderte Niederschlagsmuster und -mengen

Im globalen Mittel nehmen die Niederschläge zu; jede weitere globale Erwärmung um 1 °C erhöht den mittleren Niederschlag weltweit um 1–3 %, wobei sich regional das Ausmaß und die Richtung der Änderungen und damit auch ihre Wirkungen stark unterscheiden. Im Vergleich zum Zeitraum 1995–2014 könnte die global gemittelte Niederschlagsmenge über Land bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 13 % steigen (IPCC, 2021a: 19). Projektionen regionaler Veränderungen der Niederschlagsmengen hängen vom Ausmaß der zukünftigen globalen Erwärmung ab (Abb. 3.1-1, 3.1-2) und variieren mit teils großen Unsicherheiten (Caretta et al., 2022: 598).

Der Weltklimarat geht in seinem sechsten Sachstandsbericht davon aus, dass eine Zunahme der mittleren Niederschlagsmenge pro Jahr insbesondere für das äthiopische Hochland, Ost-, Süd- und Nordasien, das südöstliche Südamerika, Nordeuropa, für Teile Nordamerikas sowie für die Polarregionen zu erwarten sind (Douville et al., 2021: 1110; IPCC, 2023b). Im Gegensatz dazu ist für das südliche Afrika, Westafrika, Amazonien, den Südwesten Australiens, Zentralamerika, für Teile Südamerikas und den Mittelmeerraum eine Abnahme zu erwarten. In der Arktis wird der Schneefall in Zukunft weiter abnehmen und zunehmend durch Regen ersetzt werden (Douville et al., 2021: 1110). Die veränderten Niederschlagsmuster

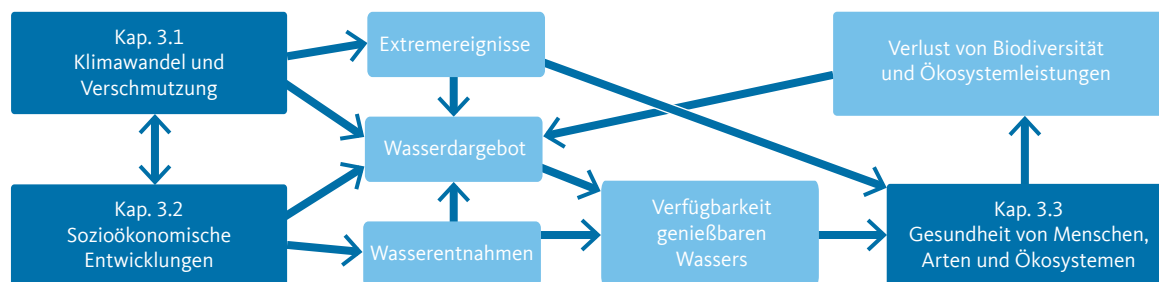


Abbildung 3-1

Verschärfungen wasserbezogener Probleme, wie sie in Kapitel 3 diskutiert werden. Der Klimawandel verändert den globalen Wasserkreislauf mit der Folge zunehmender Extremereignisse wie Dürren oder Überflutungen. Verschmutzungen nehmen globale, regional unterschiedliche Dimensionen an. Beides kann das Wasserdargebot beeinflussen. Parallel dazu steigen weltweit die Wasserentnahmen durch Landwirtschaft, Industrie und Haushalte. In der Folge verstärkt sich der Druck auf die Verfügbarkeit genießbaren Wassers. Daraus resultieren Verschärfungen wasserbezogener Probleme. Diese umfassen gesundheitliche Schäden beim Menschen und ihre sozioökonomischen Auswirkungen, Nutzungskonkurrenzen um Wasser oder zunehmende Schäden aufgrund von Wetterextremen oder Verluste an Biodiversität durch gesundheitliche Beeinträchtigungen von Arten und Ökosystemen. Der resultierende Verlust von Ökosystemleistungen kann sich wieder negativ auf das Wasserdargebot auswirken.

Quelle: WBGU

und -mengen werden auch in Zukunft global zu häufigeren und intensiveren Extremereignissen wie Starkregen oder Dürren führen (Kap. 3.1.1.5; IPCC, 2019b: 9 f.).

3.1.1.2

Abnehmende Bodenfeuchte in vielen Regionen

Für die Zukunft wird ein weiter zunehmender Anstieg der mittleren globalen Verdunstung über großen Teilen des Ozeans, eine Zunahme der globalen atmosphärischen Wasseraufnahme, verbunden mit potenziell erhöhter Verdunstung und Verlust von Wasser von der Erdoberfläche prognostiziert. Daraus resultiert eine Zunahme der Evapotranspiration, d. h. der Summe aus direkter Verdunstung aus Boden- und Wasseroberflächen (Evaporation) und

Abgabe durch Pflanzen und Tiere (Transpiration), in den meisten Landgebieten – außer in denjenigen Regionen, die bereits sehr trocken sind (Douville et al., 2021: 1058, 1117). Durch zusätzlich reduzierte Niederschläge wird die Bodenfeuchte in Regionen wie dem Mittelmeerraum, Südafrika und dem Amazonasbecken sowie in Teilen von Nord- und Südamerika und Australien mit großer Wahrscheinlichkeit weiter abnehmen, während sie in anderen Regionen zunehmen wird (Abb. 3.1-3; Douville et al., 2021: 1121 f., IPCC, 2023b).

Die Veränderung in der Bodenfeuchte wird mit jedem Grad Erwärmung zunehmen. Bei einer globalen Erwärmung um 4 °C könnte sich die Bodenfeuchte in einigen Regionen wie Amazonien, dem südlichen Afrika und

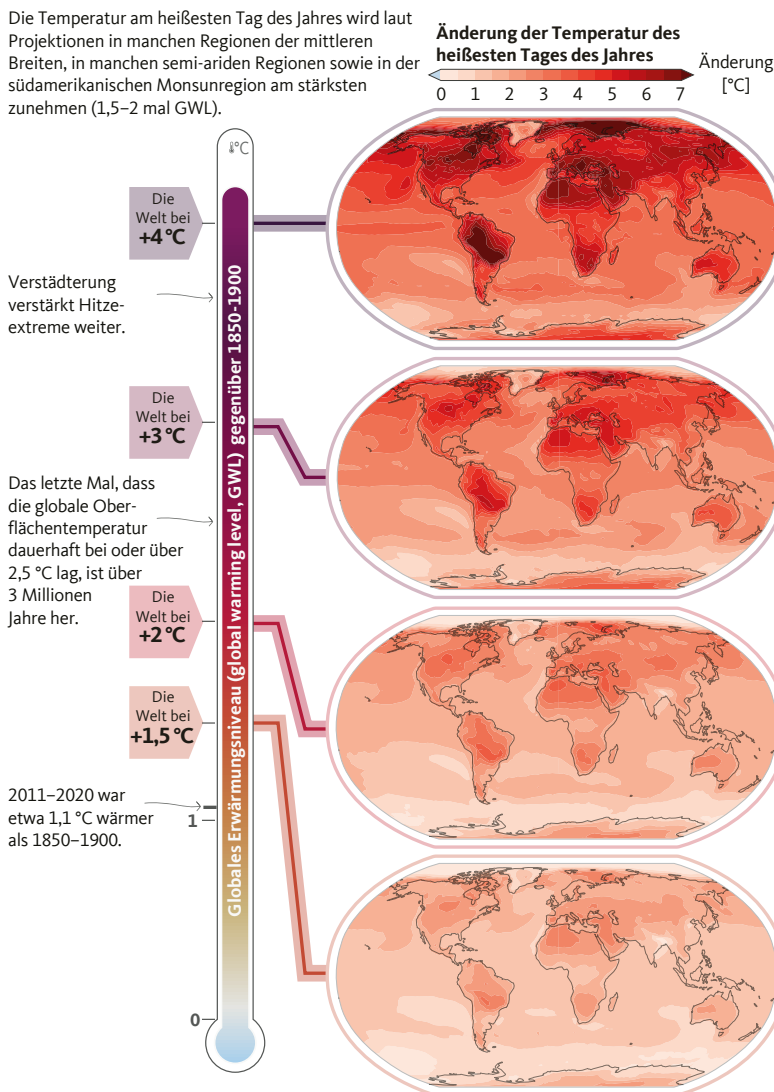


Abbildung 3.1-1

Änderungen der Temperatur des heißesten Tages des Jahres. Gezeigt sind die projizierten Änderungen der jährlichen maximalen Tageshöchsttemperatur bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C, 2 °C, 3 °C oder 4 °C im Vergleich zu 1850–1900.

Quelle: verändert nach IPCC, 2023a

3 Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

Der Niederschlag am regenreichsten Tag des Jahres wird laut Projektion in fast allen kontinentalen Regionen zunehmen, sogar in Regionen, in denen die jährliche mittlere Bodenfeuchte laut Projektion abnimmt.

Änderung des Niederschlags am regenreichsten Tag des Jahres

Änderung [%]

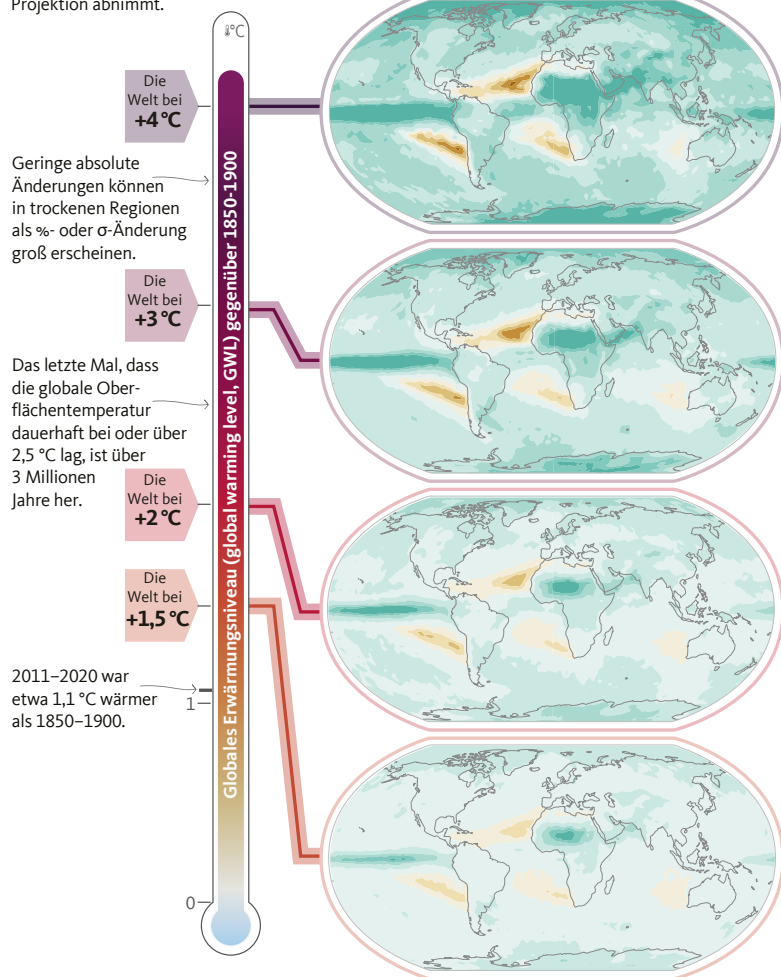


Abbildung 3.1-2

Änderungen des Niederschlags am regenreichsten Tag des Jahres. Gezeigt sind projizierte Änderungen des jährlichen maximalen Tagesniederschlags bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C, 2 °C, 3 °C oder 4 °C im Vergleich zu 1850-1900.

Quelle: verändert nach IPCC, 2023a

Westeuropa um bis zu 40 % verringern (Caretta et al., 2022: 601). Gemeinsam mit den signifikanten Einflüssen von Landnutzungsänderungen auf hydrologische Prozesse wie Evapotranspiration und Bodenfeuchte (Zhang und Schilling, 2006) wird sich dies auf die Niederschläge, die Grundwasserneubildung, die Ökosystemeigenschaften und -funktionen sowie über die Abnahme des grünen Wassers auf die Land- und Forstwirtschaft auswirken (Kap. 3.2). In anderen Regionen wird aber auch eine Zunahme der Bodenfeuchte erwartet (Abb. 3.1-3).

3.1.1.3

Abnahme globaler Süßwasserreservoirs: Grundwasser und Kryosphäre

Die als Grundwasser gespeicherte Menge Süßwasser hat insbesondere durch Bewässerungsmaßnahmen global bereits abgenommen (Kap. 2.2.3.1; Caretta et al., 2022). Das Verständnis der Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels auf das Grundwasser ist durch Limitierungen in der Datenerhebung immer noch eingeschränkt (Caretta et al., 2022). Die Grundwasserentnahmen z. B. für Bewässerung werden jedoch durch den Einfluss des Klimawandels steigen und voraussichtlich die nicht erneuerbaren Grundwasseranteile weltweit erschöpfen (Caretta et al., 2022: 611). Aquifere in den Tropen und

Projektionen der jährlichen mittleren Bodenfeuchte entsprechen im Großen und Ganzen den Projektionen des jährlichen mittleren Niederschlags, zeigen aber aufgrund des Einflusses der Evapotranspiration auch einige Unterschiede.

Änderung der jährlichen mittleren Bodenfeuchte über die gesamte Bodensäule
 -1,5 -1,0 -0,5 0 0,5 1,0 1,5 Änderung [σ]

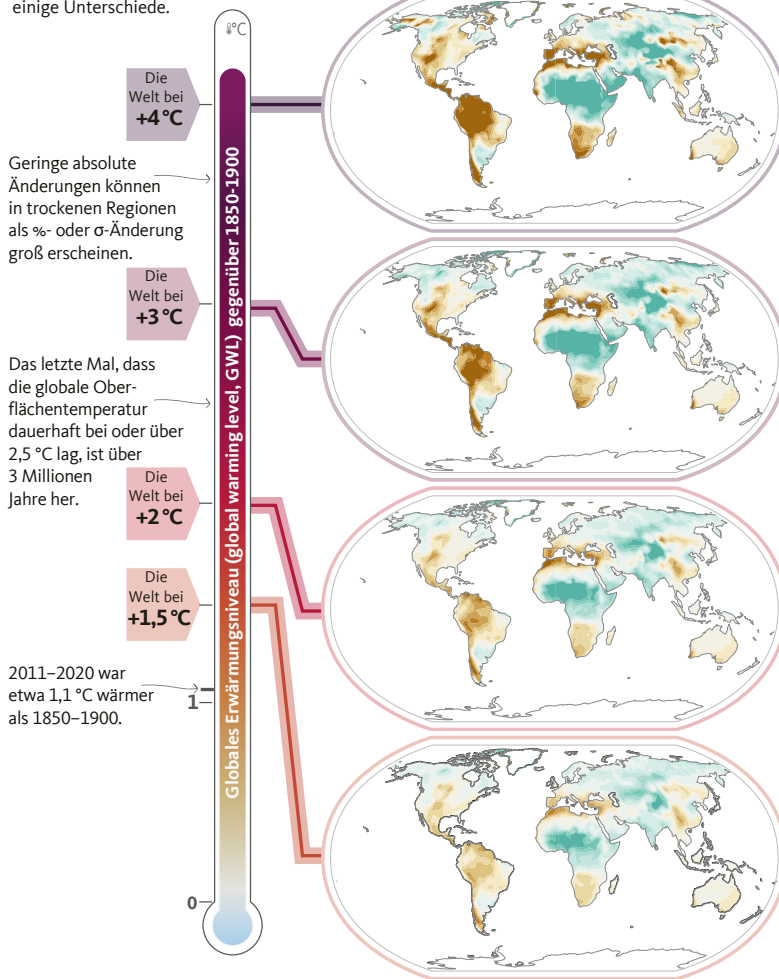


Abbildung 3.1-3

Änderungen der jährlichen mittleren Bodenfeuchte. Gezeigt sind projizierte Änderungen der jährlich gemittelten Bodenfeuchte über die gesamte Bodensäule bei einer globalen Erwärmung von 1,5°C, 2°C, 3°C oder 4°C im Vergleich zu 1850–1900.

Quelle: verändert nach IPCC, 2023a

semiariden Regionen werden durch die voraussichtliche Zunahme (intensiver) Niederschläge in der Zukunft episodisch wieder aufgefüllt, was ihre Resilienz erhöhen könnte. In semiariden Regionen besteht allerdings die Gefahr, dass die Wiederauffüllung durch eine übermäßige Entnahme zunichte gemacht wird (Caretta et al., 2022: 611). Ein zunehmender Verlust von Grundwasser kann hydrologische Dürren verstärken, Grundwasserversalzung verursachen und grundwasserabhängige Ökosysteme wie Wälder schädigen (Kap. 4.6; Caretta et al., 2022). Weitere Folgen sind das Versiegen von Brunnen, der Verlust von Vegetation, eine verringerte Biodiversität sowie das Eindringen von Abwässern in Grundwasserleiter (Liu et al., 2022; Huggins et al., 2022). Eine der gravierendsten

Auswirkungen eines dauerhaften Grundwasserentzugs ist jedoch die Absenkung der Landoberfläche. Zunehmend anfällig sind Gebiete, in denen menschliche Eingriffe, natürliche Abflüsse und geringe Neubildung über einen langen Zeitraum zu Wasserspeicherverlusten und einer Verdichtung anfälliger Grundwasserleitersysteme führen. Potenzielle Senkungsgebiete umfassen dicht besiedelte und bewässerte Gebiete mit hoher Grundwasserbeanspruchung u. a. in Asien (z. B. in der Nordchinesische Ebene) und Nordamerika (z. B. in der Küstenebene des Golfs von Mexiko), in Küsten- und Flussdeltagebieten (z. B. in Vietnam, Ägypten oder in den Niederlanden) sowie in Binnensedimentbecken, wie in Mexiko, dem Iran und in Mittelmeerländern (Herrera-Garcia et al.,

2021). Bodenabsenkungen führen zu Erdrissen, die in urbanen und dicht besiedelten Regionen hohe direkte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen und auch im Binnenland das Risiko von Überschwemmungen aus Gewässern oder Niederschlägen erhöhen können (Herrera-Garcia et al., 2021). Laut Herrera-Garcia et al. (2021) sind weltweit rund 2,2 Mio. km² oder 1,6 % der Landfläche, rund 19 % der Weltbevölkerung und rund 12 % des globalen BIP von potenziellen Absenkungen betroffen. Während der größte Anteil der wirtschaftlichen Verluste auf Hocheinkommensländer entfällt, findet sich der Großteil der exponierten Bevölkerung in Niedrigeinkommensländern.

Das Abschmelzen der Kryosphäre – Eisschilde, Gletscher und Schneebedeckung – durch die globale Erwärmung wird sich fortsetzen. Im Verlauf des 21. Jahrhunderts ist mit einem zunehmenden Verlust der globalen Gletschermasse zu rechnen, begleitet von einer zunehmend geringeren Ausdehnung und Masse der Schneebedeckung (IPCC, 2021c: 134). Die für den Zeitraum zwischen 2015 und 2100 projizierten globalen Rückgänge in Gletschermasse liegen zwischen 22–44 % (RCP2.6) und 37–57 % (RCP8.5; Hock et al., 2019), wobei diese Veränderungen im Zuge des Klimawandels regional teilweise stark variieren. Ein verstärktes Abschmelzen der Gletscher sowie Veränderungen in Ausmaß, Menge und Saisonalität der Schneebedeckung führen zumindest vorübergehend zu Veränderungen in den assoziierten schnee- und gletschergespeisten Flüssen, bis hin zu Flussüberschwemmungen (IPCC, 2019a: 134; Caretta et al., 2022: 556). Während die Gesamtabflussmengen infolge schmelzender Gletscher zunächst ansteigen, fällt der Anteil des Gletscherschmelzwassers nach Erreichen des „Peak Water“ (d. h. dem Zeitpunkt des maximalen jährlichen Gesamtabflusses eines Gletschers) solange ab, bis der Gletscher vollständig abgeschmolzen ist. Besonders in warmen und trockenen Phasen kann diese Entwicklung in gletschergespeisten Flussbecken zunehmend zu Wasserknappheit beitragen (Abb. 3.1-4). Global gesehen variiert der Zeitpunkt für Peak Water je nach Region und Größe der Gletscher, wird aber bis Mitte bzw. spätestens Ende des 21. Jahrhunderts erwartet (Hock et al., 2019). Diese Veränderungen werden weitreichende direkte und indirekte Folgen für die ökologischen und menschlichen Gemeinschaften haben, die von diesen Flusssystemen versorgt werden. Die erwarteten Auswirkungen der Gletscherschmelze auf den Gesamtabfluss des Einzugsgebiets sind jedoch stark (regional) variabel und u. a. von Niederschlagsabfluss, Grundwasserabfluss und Schneeschmelze beeinflusst (Nie et al., 2021; Kap. 3.1.1.4). Hinzu kommt der fortschreitende Verlust von Eisbedeckung auf Seen und Flüssen und eine reduzierte Dauer der Eisbedeckung, die zu einer zunehmenden Anzahl von Jahren führt, in denen ganzjährige bzw.

saisonale Eisbedeckung vollständig fehlt. Global ist die Eisbedeckung von Flüssen bereits um 25 % gesunken (1984–2018; Parmesan et al., 2022).

Die globale Erwärmung wird auch zu weiteren Verlusten im Volumen sowie in der Ausdehnung des Permafrosts führen: Pro 1 °C globaler Lufttemperaturänderung wird das Volumen in den oberen 3 m um etwa 25 % abnehmen. Insbesondere in den Hochgebirgsregionen wird der Permafrost im Laufe des Jahrhunderts zunehmend auftauen und degradieren (Fox-Kemper et al., 2021: 1216). Neben hydrologischen Veränderungen (Kap. 2.2.1) wird dies außerdem zur Freisetzung von CO₂ und Methan führen (Canadell et al., 2021: 677), allerdings sind die Projektionen der Rückwirkungen auf den Klimawandel bislang nicht eindeutig (Jin et al., 2022). Insgesamt steht immer weniger Schmelzwasser aus gefrorener Langzeitspeicherung zur Verfügung, was sich unter anderem auf die saisonale Verfügbarkeit von Süßwasser auswirkt, sowohl in der Spitze als auch im Minimum (Kap. 3.1.1.4).

3.1.1.4

Veränderte Abflussregime

Weiter steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster (Kap. 3.1.1.1), zurückweichende Gletscher und eine reduzierte Schneedecke (Kap. 3.1.1.3) werden sich auch in Zukunft stark auf die Abflussregime (Landoberfläche und Flüsse) sowie deren Variabilität auswirken, sowohl im Jahresmittel als auch saisonal. Weltweit werden die mittleren Abflussmengen mit fortschreitender globaler Erwärmung zunehmen, allerdings mit regional unterschiedlichen Ausprägungen (Abb. 3.1-5; Douville et al., 2021: 1119). Zunehmende Abflussmengen werden insbesondere für die nördlichen hohen Breitengrade sowie Regionen in Zentral- und Ostafrika vorhergesagt, während Abnahmen im Mittelmeerraum sowie in Teilen Mittel- und Südamerikas insbesondere in den Sommermonaten erwartet werden (Douville et al., 2021: 1119).

Gleichzeitig werden die jahreszeitlichen Schwankungen der Abflussmengen regional zunehmen (Douville et al., 2021: 1058). Die mit der Schneeschmelze im Frühjahr verbundenen Abflussspitzen werden außerdem früher im Jahr auftreten und der durch die Schneeschmelze verursachte Abfluss mit dem Rückgang des Schnees abnehmen. Insgesamt wird nach Überschreiten der maximalen Abflussmengen auch aus der Gletscherschmelze (Kap. 3.1.1.3) der mittlere jährliche Abfluss in einem Drittel der vergletscherten Einzugsgebiete bis zum Jahre 2100 unter dem RCP4.5-Szenario um mindestens 10 % abnehmen. Die stärksten Rückgänge sind in Zentralasien und in den Anden zu erwarten (Caretta et al., 2022: 556; Huss und Hock, 2018). Die Gletscherschmelze kann die Trinkwasserversorgung beeinträchtigen (Kap. 4.4).

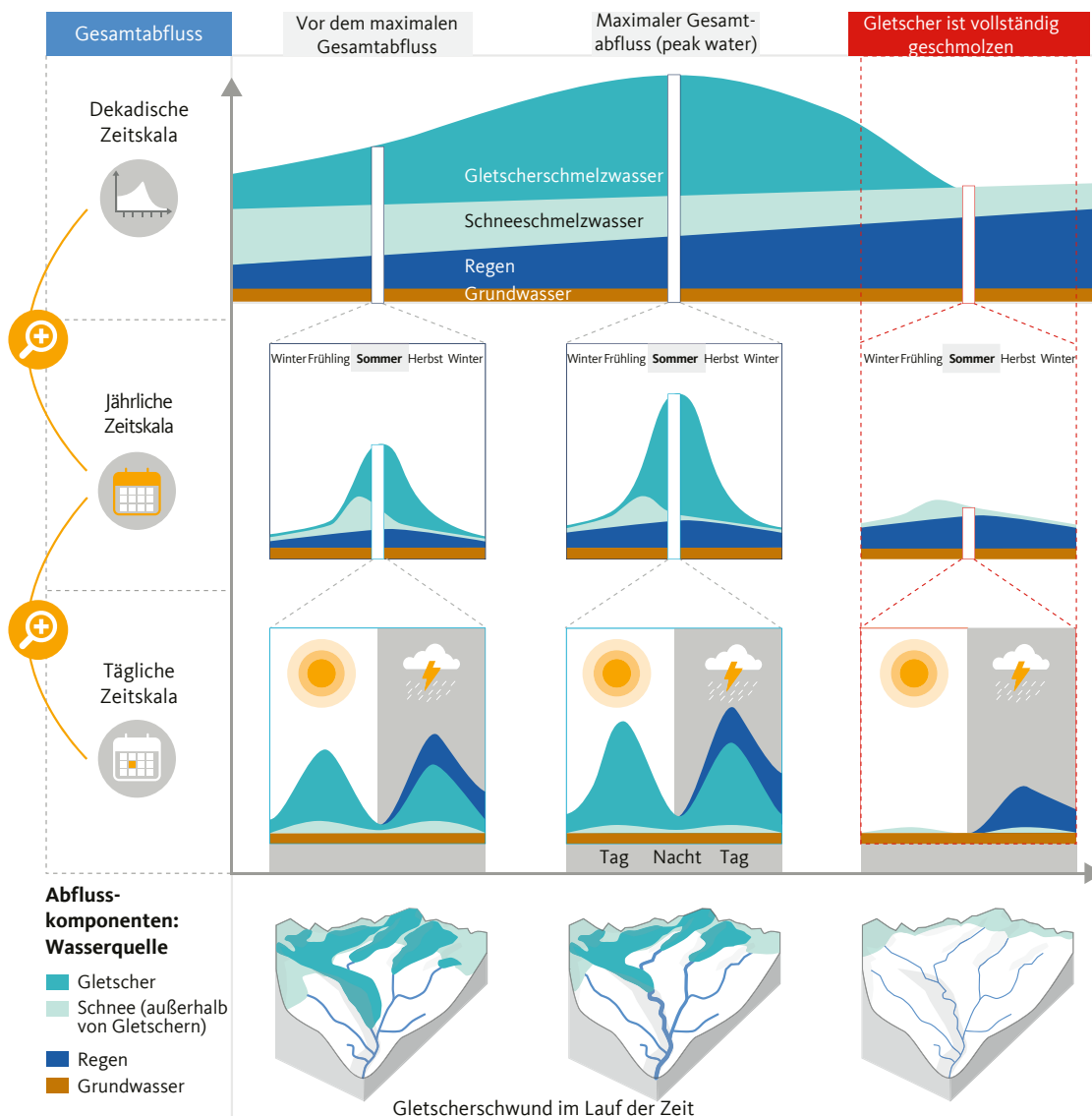


Abbildung 3.1-4

Auswirkungen von Gletscherschmelze. Gezeigt ist ein vereinfachter Überblick über die relativen Wassermengen aus verschiedenen Quellen, die bei schrumpfenden Gletschern in einem Flusseinzugsgebiet mit großer Gletscherbedeckung (z. B. >50 %) zu Veränderungen des Abflusses führen. Die Quellen sind Gletscher, Schnee (außerhalb des Gletschers), Regen und Grundwasser. Quelle: Hock et al., 2019

3.1.1.5

Zunahme kombinierter Wasser-Extremereignisse

Die Häufigkeit und Schwere von Überschwemmungen und Dürren wird weiter zunehmen (IPCC, 2019a). Landwirtschaftliche und hydrologische Dürren werden „in einer wärmeren Zukunft voraussichtlich häufiger, länger und schwerer werden“ (Yuan et al., 2023). Regionen wie der Mittelmeerraum, Südafrika, Zentralamerika und das

Amazonasbecken sowie Teile von Nord- und Südamerika und Australien werden voraussichtlich trockener werden, sowohl durch geringere Niederschläge als auch durch einen Anstieg der Verdunstung (Abb. 3.1-6). Dürren werden also ausgeprägter und dauern länger, je nach beschrittenem Emissionsszenario für Treibhausgase (Caretta et al., 2022: 610). Auch Blitzdürren werden häufiger und intensiver auftreten, da trockene Bedingungen häufiger

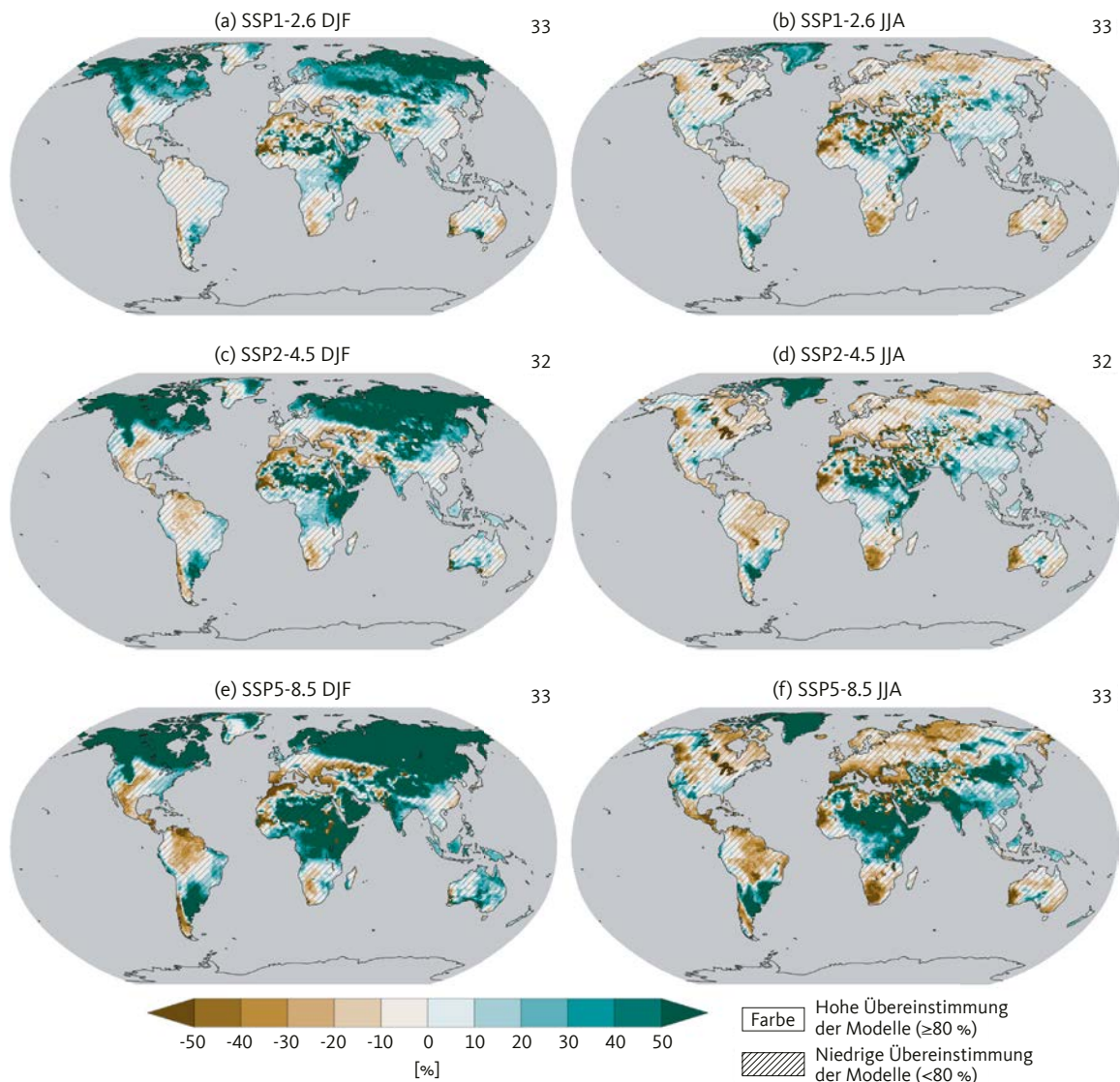


Abbildung 3.1-5

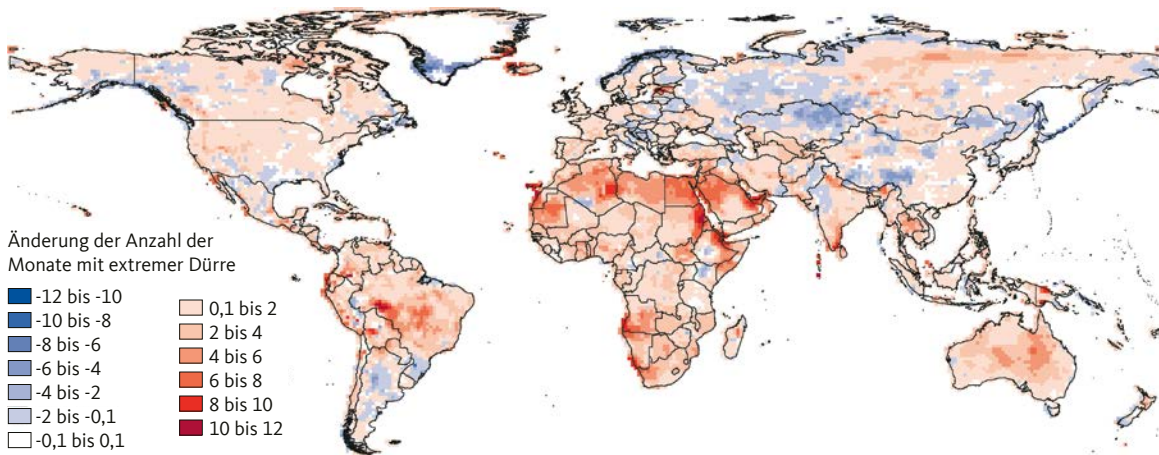
Zukünftige Änderungen der Abflüsse. Gezeigt sind projizierte langfristige relative Änderungen des saisonalen Mittelwerts der Abflüsse im Zeitraum 2081–2100 im Vergleich zu 1995–2014. Die globalen Karten geben die projizierten relativen Änderungen [%] des saisonalen Abflusses im Mittel für Dezember, Januar, Februar (DJF; linke Seite) und Juni, Juli, August (JJA; rechte Seite) wieder, gemittelt über die verfügbaren CMIP6-Modelle (die Anzahl der Modelle ist bei jeder Karte oben rechts angegeben) SSP1.2-6 (a, b), SSP2-4.5 (c, d) bzw. SSP5-8.5 (e, f).

Quelle: Douville et al. 2021: 1118

mit höheren Temperaturen einhergehen und die relative Feuchtigkeit in vielen Regionen weiter abnimmt (Yuan et al., 2023).

Auch Überschwemmungen werden in vielen Regionen häufiger auftreten, z. B. in Asien, Zentralafrika, Westeuropa, Mittel- und Südamerika, in Teilen Nord- und

Südamerikas, im Mittelmeerraum und in Osteuropa. Sie stellen in Abhängigkeit von Region und Überschwemmungsart ein zunehmendes sozioökonomisches Risiko dar (Caretta et al., 2022: 608). Voraussichtlich wird zukünftig auch ein größerer Teil der Landflächen von Flussüberschwemmungen betroffen sein, wobei die

**Abbildung 3.1-6**

Änderungen extremer Dürren. Gezeigt ist die Veränderung der Anzahl der Monate mit extremer Trockenheit pro Jahr (im Zeitraum 2013–2022 im Vergleich zu 1951–1960). Regionen mit Zunahmen der Dürren sind in rot, Regionen mit Abnahmen der jährlichen Anzahl Monate mit extremer Trockenheit in blau dargestellt. Regionen ohne Veränderungen sind weiß hinterlegt.

Quelle: Romanello et al., 2023

regionalen Projektionen aufgrund menschlicher Einflüsse wie Wassermanagement oder Veränderungen der Bodenbedeckung z. B. durch Bebauung oder Landwirtschaft stark variieren (Caretta et al., 2022: 605 f.; Seneviratne et al., 2021).

Die modellierten Auswirkungen steigen mit zunehmender Erwärmung, gleichzeitig steigt aber auch die Variabilität der Ergebnisse (Dottori et al., 2018). Die Auswirkungen zukünftiger Überschwemmungen sind zudem regional ungleich verteilt, wobei die größten Verluste auf den asiatischen und afrikanischen Kontinenten zu erwarten sind (Dottori et al., 2018; Merz et al., 2021). Häufigere und stärkere Starkniederschläge werden – gemeinsam mit anderen Faktoren wie der zunehmenden Urbanisierung – auch zu einem vermehrten und intensiveren Auftreten von Sturzfluten führen (Fowler et al., 2021; Yin et al., 2023). Für trockene Regionen bedeutet dies trotz eines Rückgangs der Gesamtmenge der Niederschläge eine Zunahme der extremen Niederschläge (Tabari, 2020).

3.1.1.6

Meeresspiegelanstieg, variable Salinitäten und abnehmende Ozeanströme

Der Meeresspiegelanstieg wird durch die Erwärmung und damit verbundene Ausdehnung des Meerwassers sowie durch abschmelzende Gletscher und Eisschelfe verursacht. Die resultierende Aussüßung – d. h. die sukzessive

Reduktion der Salinität – der Oberflächenschichten des Ozeans bremst die Tiefenwasserbildung vor Grönland und damit den Antrieb der großskaligen Ozeanströme, die den Wärmehaushalt der Erde stabilisieren und die Tiefsee mit Sauerstoff versorgen. Betroffen ist auch der Golfstrom, der das milde Klima und die Niederschläge Europas formt und jahreszeitliche Extreme ausgleicht. Im fortschreitenden Klimawandel nimmt der Golfstrom jedoch progressiv ab, ein zumindest partieller Zusammenbruch ist nach neueren Befunden noch in diesem Jahrhundert möglich (Ditlevsen und Ditlevsen, 2023; van Westen et al., 2024). In Europa würde dies eine starke Abkühlung auslösen (mit Durchschnittstemperaturen um 5°–15 °C niedriger als heute in vielen Europäischen Städten), deren Auswirkungen aber bislang kaum vorhersagbar sind (van Westen et al., 2024).

Eine Milliarde Menschen leben derzeit küstennah und sind zunehmend direkt vom zunehmenden Meeresspiegelanstieg und entsprechend höher auflaufenden Sturmfluten betroffen (IPCC, 2019a). Der Sonderbericht des Weltklimarats zu den Ozeanen und der Kryosphäre (IPCC, 2019a) ging davon aus, dass der künftige Meeresspiegelanstieg bei einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C möglicherweise für lange Zeit unterhalb von 1 m stabilisiert werden kann. Bei stärkerer Erwärmung kann er jedoch schon bis 2100 darüber hinausgehen und schließlich mehrere Meter betragen (IPCC, 2019a; IPCC, 2021c). Die korrekte Abschätzung

der Stabilität (west-)antarktischer und grönländischen Eisschelfe ist dabei ein großer Unsicherheitsfaktor – die Wassermenge, die aktuell insgesamt in den antarktischen und grönländischen Gletschern gespeichert ist, entspricht einem Meeresspiegelanstieg von 65 m (Fox-Kemper et al., 2021: 1316).

Ende Oktober 2023 veröffentlichten britische Polarforschende eine Studie, wonach die Gletscher des Westantarktischen Eisschildes in den kommenden 80 Jahren unaufhaltsam und schneller als bisher angenommen ins Meer gleiten werden – selbst dann, wenn es der Welt gelänge, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen (Naughten et al., 2023). Hinzu kommt noch das beschleunigte Abschmelzen grönländischer Eismassen (IPCC, 2019a). Das heißt, nach neueren Erkenntnissen sind die zunehmenden Gletscherabflüsse in den sich erwärmenden Ozean bis zum Jahr 2300 bereits bei 1,5 °C globaler Erwärmung nicht mehr zu verhindern, mit einem projizierten Anstieg des Meeresspiegels um bis zu 3 m (IPCC, 2021c). Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten und der jüngsten Befunde erscheint sogar ein Meeresspiegelanstieg um bis zu 7 m im gleichen Zeitraum möglich – ein Anstieg, wie ihn die Erde in der letzten Warmzeit vor ca. 125.000 Jahren bei einer vergleichbaren Durchschnittstemperatur gehabt hat (Rohling et al., 2019).

Populationsgenetische Daten antarktischer Oktopoden weisen darauf hin, dass dieser Meeresspiegelanstieg wahrscheinlich vom Kollaps des West-Antarktischen Eisschildes begleitet war. Diese Schlussfolgerung ist durch den Genaustausch zwischen ansonsten durch das Eis getrennten Populationen belegt (Lau et al., 2023). Auch über die 7 m hinaus wird sich der Meeresspiegelanstieg abhängig vom Ausmaß des Klimawandels über Jahrhunderte fortsetzen. Dieser Herausforderung ist der aktuelle Küstenschutz an niedrig liegenden Küsten nicht mehr gewachsen (Oppenheimer et al., 2019). Der Klimawandel hat demnach längst Prozesse angestoßen, die sich kurzfristig nicht mehr aufhalten oder umkehren lassen, für die Menschheit ein Zeichen von Kontrollverlust. Von Überflutung bedroht sind auch zukünftig vor allem niedrig liegende Küsten und kleine Inseln. Sterische Effekte (die Ausdehnung der Wassermassen aufgrund von Veränderungen der Dichte, hervorgerufen durch Änderungen in der Salinität bzw. Wassertemperatur), Ozeanströmungen, Landhebungen und -absenkungen sowie Veränderungen von Schwerefeldern aufgrund der Schmelze der großen Eismassen in Grönland und der Antarktis oder aufgrund vertikaler Landbewegungen bewirken dabei einen regional unterschiedlichen Meeresspiegelanstieg. Lokal spielt auch das Absinken des Meeresbodens durch die Entnahme von Grundwasser und die Förderung von Öl und Gas eine Rolle.

Mit dem ansteigenden Meeresspiegel werden immer höhere und intensivere Sturmfluten auflaufen (IPCC,

2019a), die gegebenenfalls weit ins Landesinnere und in die dortigen Süßwassersysteme vordringen können. Eine Versalzung der Süßwasserreserven wird mit dem Meeresspiegelanstieg an vielen Küsten oder auf kleinen Inseln auch über das Grundwasser erfolgen. Steigendes Meerwasser dringt z. B. in die Süßwasserlinsen von Inseln ein und führt zu einem Anstieg der Salinität (Cantelon et al., 2022; Mazhar et al., 2022). Aber auch in ariden Gebieten wird die Versalzung der Süßwasserreserven und der Böden zunehmen. Bei zunehmender Trockenheit oder bei expandierender Landwirtschaft wird Bewässerung zunehmen (Kap. 3.2.1.1), die Verdunstung führt zur Aufkonzentrierung der im Wasser gelösten Mineralien und damit zur Versalzung.

3.1.1.7

Schlussfolgerungen

Die durch den zunehmenden Klimawandel verschärften Lebensbedingungen fordern schon jetzt die Anpassungsfähigkeit von Natur und Mensch heraus. Anpassungen des Menschen an das bisherige Ausmaß der Veränderungen sind bereits erforderlich. Auch die Natur unterliegt bereits jetzt großräumigen Veränderungen, die als Anpassungen oder ausweichende Reaktionen verstanden werden können (IPCC, 2022a). Dabei nimmt sowohl die Kapazität der Menschen zur Anpassung als auch die der Natur mit fortschreitendem Klimawandel kontinuierlich ab (IPCC, 2022a). Um Anpassungsfähigkeit weitgehend zu erhalten, ist es nach dem Vorsorgeprinzip alternativlos, den Klimawandel bei 1,5 °C globaler Erwärmung zu begrenzen und langfristig – sofern möglich – sogar rückgängig zu machen. Dies erfordert die Beendigung anthropogener CO₂-Emissionen und die starke Minderung der Emissionen anderer Treibhausgase sowie die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre.

Schon die Befunde zum Meeresspiegelanstieg belegen, dass Grenzen der Anpassungsfähigkeit überschritten werden könnten. Insbesondere mit Blick auf immer häufigere und intensivere Extremereignisse wie Hitzeperioden, Überflutungen und Dürren werden die Risiken für Mensch und Natur in vielen Regionen zunehmend unbeherrschbar (Kap. 4).

3.1.2

Extremereignisse (über)fordern die Infrastruktur

Die häufiger auftretenden Wetterextreme haben Auswirkungen auf die Infrastruktur zum Hochwasserschutz und für die Bereitstellung einer sicheren Trinkwasserversorgung. Diese Belastungen werden sich künftig verstärken.

Ingenieurbauten wie Deiche, Talsperren und Kanalisationsnetze werden für einen maximalen Belastungsfall, also einen maximalen Durchfluss, den das Bauwerk

unbeschadet abführen kann, dimensioniert. In Deutschland dient beispielsweise für Deiche ein Hochwasser mit einer statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren (HQ_{100}) als Grundlage der Berechnung; bei Talsperren sind es je nach Größe 1.000 oder 10.000 Jahre (DIN 19 700). Darüber hinaus werden Flächen, in denen ein 100-jähriges Hochwasserereignis zu erwarten ist, nach dem Wasserhaushaltsgesetz als Überschwemmungsgebiete ausgewiesen (WHG § 76). In diesen Gebieten ist die Ausweisung von Baugebieten und die Genehmigung von Bauvorhaben grundsätzlich verboten und nur noch in Ausnahmefällen zulässig. Auch bei der hydraulischen Dimensionierung von Kanalnetzen in Siedlungen werden historische Niederschlagsdaten zugrunde gelegt, um die Häufigkeit von Überflutungen, also einem Zustand, bei dem ungeklärtes Abwasser ungewollt an die Oberfläche austritt, zu minimieren (DIN EN 752). Mit dem Klimawandel verschieben sich jedoch diese Berechnungsgrundlagen für die Belastung der Infrastruktur sowohl mit Bezug auf die Frequenz von Hochwasserereignissen als auch den Bedarf an Überschwemmungsgebieten und an Kapazitäten der Kanalnetze.

Die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremniederschlägen führt mittlerweile weltweit zu höheren Spitzenabflusswerten und zu höheren Wiederkehrwahrscheinlichkeiten. Die derzeit übliche Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Anlagen und die Ausweisung von durch Hochwasser gefährdeten Flächen anhand historischer Datenreihen ist daher nicht mehr zeitgemäß, um die steigenden Gefahren für die menschliche Gesundheit und die ökonomischen Hochwasserschäden zu minimieren. Das Risiko eines Infrastrukturversagens, wie es zuletzt bei der Flutkatastrophe in Libyen 2023 beobachtet werden konnte, als nach einem extremen Niederschlagsereignis zwei Talsperren brachen (Henson und Masters, 2023), wird also weiter zunehmen. In Deutschland ist die Wasserwirtschaft entsprechend davon abgerückt, von Hochwasserschutz zu sprechen. Sie hat stattdessen eine Risikocharakterisierung übernommen, bei der erhöhte Risiken von Extremereignissen durch unterschiedliche Maßnahmen zwar gemindert, aber nicht mehr völlig oder weitgehend ausgeschlossen werden können.

Ähnlich verhält es sich mit der hydraulischen Auslegung wasserwirtschaftlicher Anlagen für eine sichere Wasserversorgung bei zunehmenden Dürren und Hitzewellen. Ausgeprägte Hitzewellen führen zu höheren Tagesspitzenverbräuchen, für die weder die Kapazität der Aufbereitungsanlagen noch die der Verteilungsnetze ausgelegt sind. Es kann daher zeitweise zu Versorgungsengpässen und Nutzungseinschränkungen kommen. Langanhaltende Dürreperioden verändern das Bodenfeuchteregime und führen zum Versiegen von oberflächennahen Quellwasserschüttungen sowie zu einem

flächendeckenden Absinken der Grundwasserstände und Pegel von Oberflächengewässern. Dies gefährdet die ausreichende Bereitstellung von Trinkwasser.

Fehlende Abflüsse in den Fließgewässern bei langen Dürreperioden können durch höhere Belastungen mit Pathogenen und organischen Spurenstoffen zu einer weiteren Verschlechterung der Rohwasserqualität führen (Kap. 3.1.3; Karakurt et al., 2019), so dass bestehende Aufbereitungsverfahren nicht mehr in der Lage sind, eine einwandfreie Trinkwasserqualität zu gewährleisten.

Eine zusätzliche Herausforderung ist, dass Trinkwasserversorgungssysteme oft nicht redundant sind, sondern dass ein Siedlungsgebiet über nur eine Wasserressource (z. B. Grundwasser, Oberflächenwasser, Uferfiltration) versorgt wird. Ein Ausfall dieser Wasserressource durch Dürre bzw. Hitze, der nicht durch eine Diversifizierung der Versorgung über andere Wasserquellen ausgeglichen werden kann, kann also eine existenzielle Gefahr sein. Neben der Nahrungsmittelproduktion (durch landwirtschaftliche Bewässerung) und der Trinkwasserversorgung wäre aufgrund der mangelnden Wasserverfügbarkeit für Abwasserentsorgung und Hygiene auch die menschliche Gesundheit direkt betroffen. Die Wasserkrise in Kapstadt von 2015 bis 2018 kam einem solchen Ausfall der Trinkwasserversorgung sehr nahe (Kap. 4.2.). In Folge der extremen Dürre im westlichen Südafrika ab 2015 sanken die Pegel der Talsperren, die für die Trinkwasserversorgung Kapstadts genutzt werden (Burls et al., 2019; Kap. 4.2). Als Sparmaßnahme wurde der Wasserverbrauch zeitweise auf 50 l pro Person und Tag begrenzt. Eine Unterbrechung der Trinkwasserversorgung und die rationierte Versorgung der Bevölkerung über Wasserverteilungspunkte konnte aufgrund einsetzender Niederschläge jedoch abgewendet werden (Burls et al., 2019). Eine Modellierungsstudie zeigt, dass das Risiko einer erneuten mehrjährigen Dürre im westlichen Südafrika je nach Treibhausgas-Emissionspfad bis 2100 um bis zu 80 % zunehmen kann (Pascale et al., 2020). Ähnliche Herausforderungen für die Trinkwasserversorgung von Städten können weltweit beobachtet werden, zuletzt 2022–2023 in Montevideo (Kap. 4.2).

3.1.3

Auswirkungen von Dürren und Extremereignissen auf die Ernährungssicherheit

Für den Menschen kulminieren die diskutierten Verschärfungen in einer zunehmenden Unsicherheit bezüglich ihrer Lebensführung, insbesondere aufgrund zunehmender Dürren und mangelnder Wasserqualität. Dürren haben durch die Einschränkung der Ernährungssicherheit und damit verbundener Fehlernährung auch diverse gesundheitliche Auswirkungen (Abb. 3.1-7; Kap. 3.3.2).

Angesichts der Bedeutung von Dürren für die Landwirtschaft und damit für die globale Ernährung und der multiplen Auswirkungen von Dürren auf Wirtschaft und Gesellschaft werden sich heute bereits absehbare oder beobachtbare Trends und ihre Auswirkungen weiter verschärfen. Entsprechend hatte die nahezu weltweit stattfindende Dürre im Jahr 2022 Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und Wassersicherheit, auf die Ernährungssicherheit sowie auf den Zugang zu Elektrizität und ökonomische Aktivitäten durch niedrige Wasserstände in den Flüssen (Romanello et al., 2023).

Der IPCC identifiziert Dürren, im Zusammenspiel der unterschiedlichen Typen von Trockenheit und ihrer kumulativen Auswirkungen, als die kostenintensivsten Naturkatastrophen (Mirzabaev et al., 2019) und weist darauf hin, dass Dürren nicht nur in ländlichen Regionen, sondern auch in Städten relevante Auswirkungen haben. Die Welternährungsorganisation (FAO) unterstreicht, dass jede fünfte Stadt mit mindestens 1 Mio. Einwohnern in einer Gegend mit einer hohen bis sehr hohen Risikoeinstufung bezüglich Dürren liegt. Insgesamt betrifft dies bislang 370 Mio. Menschen weltweit (FAO, 2019).

Trockenheit und längere, wiederholte oder besonders heiße Dürreperioden wirken sich direkt auf die Produktivität der Ernährungssysteme wie Pflanzenanbau, Tierhaltung, Aquakultur und Fischerei aus, führen zu Ertragsverlusten und potenziell zum vollständigen Verlust eines landwirtschaftlichen Zyklus (Brás et al., 2021; Zampieri et al., 2017). Gleichzeitig führen sie über das Jahr verteilt zu höheren Schwankungen in der Produktion und Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln. In Zeiten knapper Nahrungsmittel – bedingt z. B. durch die COVID-19-Pandemie, den Angriffskrieg auf die Ukraine oder Ernteaufälle durch Dürren und Starkniederschläge – sind die Preise für Nahrungsmittel zuletzt seit 2021 wieder weltweit stark ansteigend bzw. schwankend. Erfasst werden diese Entwicklungen durch den Food Price Index (FFPI) der FAO, ein Maß für die monatliche Veränderung der internationalen Preise eines Warenkorbs von Nahrungsgütern. Brás et al. (2021) weisen darauf hin, dass sich die Ernteaufälle in Europa aufgrund von Dürren und Hitzewellen in den letzten fünf Jahrzehnten bereits verdreifacht haben. Verschiedene Faktoren kommen hier zusammen, die im fortlaufenden Klimawandel zu noch ungünstigeren Entwicklungen führen werden.

Unangemessenes Landmanagement zeichnet sich durch Monokulturen, Überdüngung, Versalzung und Bodenverdichtung aus. Dies kann zur Reduktion der Bodenqualität und zu Habitatverlust für die natürliche Vegetation führen. Dadurch erhöhen sich die Risiken zerstörerischer Überschwemmungen stark; diese folgen häufig auf längere Dürreperioden. Die übernutzten und ausgetrockneten Böden können das plötzlich vorhandene Wasser nicht schnell genug absorbieren und es formen

sich reißende Ströme, die den Boden erodieren und deren zerstörerische Kraft landwirtschaftliche Flächen, Tierhaltungen und menschliche Siedlungen gefährdet (Hornidge und Scholtes, 2009; Kap. 4.3). Das Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung von Wüstenbildung (UNCCD) weist auf diese negativen Ketteneffekte hin, aus denen Verschärfungen im WBGU-Sinne entstehen, unterstreicht aber auch die positiven, sich potenziell gegenseitig (ver)stärkenden Auswirkungen von resilientem Landmanagement (Abb. 3.1-8; Reichhuber et al., 2022).

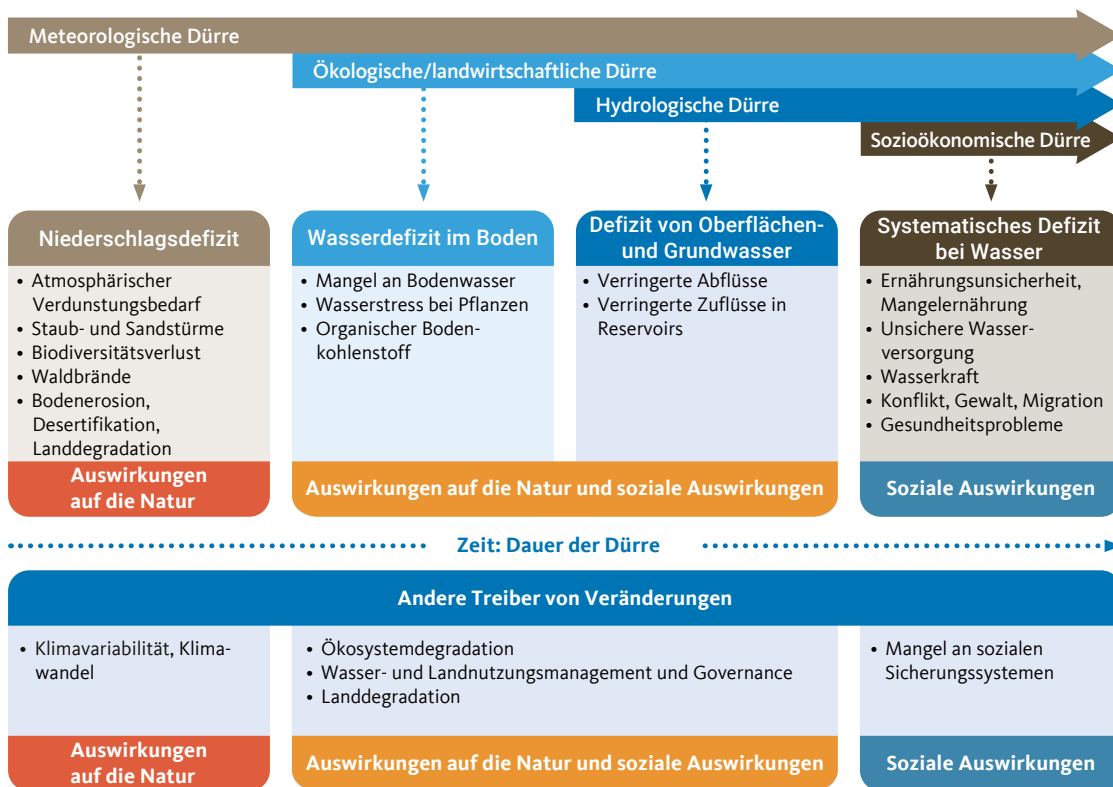
Die ausbleibenden landwirtschaftlichen Erträge in Regionen, die wiederholt von Dürreperioden, Hitzewellen und Überschwemmungen heimgesucht werden, fehlen auf lokalen und regionalen Märkten und wirken sich negativ auf die Ernährungssicherheit aus (Reichhuber et al., 2022). Armut wird somit multidimensional verstärkt, was auch den Erhalt von Zukunftsoptionen vor Ort erschwert. In besonders stark betroffenen Regionen, die mit weiteren Herausforderungen des Klimawandels sowie Artensterben, hohen Armutsraten, dazu ethnisch, religiös oder aus anderen Gründen gering ausgeprägtem gesellschaftlichen Zusammenhalt und instabilen politischen Regimen konfrontiert sind, ist die Gefahr sich gegenseitig verstärkender Risiken besonders groß – bis hin zu bewaffneten Unruhen oder erzwungenem Regierungswechsel durch bewaffnete Putsche, wie sie im vergangenen Jahr beispielsweise in der Sahelregion vermehrt zu beobachten waren (Bergmann, 2022; Unfried et al., 2022).

Der Klimawandel trägt durch den Faktor Wasser zur weiteren Verschärfung humanitärer Krisen bei. Dies ist aktuell in Ländern Subsahara Afrikas wie Mali und Burkina Faso, aber auch Äthiopien und Sudan ebenso zu beobachten wie in Ländern des Mittleren Ostens, auch in Gaza, wo kriegsbedingter Wassermangel weiter verschärft wird durch anhaltende Dürre. Betroffen sind insbesondere Bevölkerungsgruppen, deren Einkommenssicherung durch hohe Naturabhängigkeit und somit eine hohe Verwundbarkeit bei Wassermangel gekennzeichnet ist. In manchen dieser Regionen kommt es in der Folge zu einer Zunahme saisonaler oder längerfristiger Arbeitsmigration, wobei kleine Inselstaaten vom Migrationsdruck unverhältnismäßig stark betroffen sind (IPCC, 2022a).

3.1.4

Verschärfungen durch Umweltverschmutzung

Mindestens 3 Mrd. Menschen sind auf Wasser angewiesen, dessen Qualität mangels Monitoring ungewiss ist (UN, 2022). Wie sich die Wasserqualität künftig entwickelt, hängt nicht allein vom Eintrag von Schadstoffen ab. Auch Änderungen der Wasserentnahmen sowie lokaler hydrologischer Gegebenheiten, die sowohl durch Klimawandel

**Abbildung 3.1-7**

Dürreotypen und ihre Auswirkungen. Gezeigt ist eine schematische Übersicht über die Auswirkungen verschiedener Typen von Dürren auf wasserbezogene Prozesse und die gesellschaftlichen Konsequenzen. Durch Klimawandel und andere Aktivitäten des Menschen verschärfter Wassermangel betrifft alle Ebenen, vom Ökosystem bis hin zur Gesellschaft und löst dort Krisen aus, die den gesellschaftlichen Zusammenhalt und ihre Funktionen und Resilienz gegenüber den Umweltkrisen schwächen.

Quelle: Reichhuber et al., 2022

als auch sozioökonomische Entwicklungen getrieben sind, spielen eine Rolle (Jones et al., 2023).

3.1.4.1

Trends der Wasserverschmutzung

Die Verschmutzung von Wasser ist geprägt durch eine stetige Zunahme der Konzentrationen und Änderung der Zusammensetzung der Stoffe. Stoffeinträge aus Landwirtschaft und Industrie spielen dabei eine zentrale Rolle. Die Prozesse zur Bereitstellung neuer Materialien, neuer Infrastruktur und innovativer Technologien sind energie-, ressourcen- und wasserintensiv. Durch moderne, neu entwickelte Stoffe sowie durch Mischungen der Stoffe und mögliche Wechselwirkungen, etwa mit Mikroorganismen, steigt die Komplexität der Verschmutzung (Persson et al., 2022; Posthuma et al., 2019; Gomes et al., 2020; EEA, 2022). Die Langzeitriskien sind dabei meist unbekannt und Gegenstand der aktuellen Forschung.

Weltweit zeichnen sich folgende Trends der Wasserverschmutzung ab (Jones et al., 2023): Die Verschmutzung durch organische Schadstoffe – gemessen als biochemischer Sauerstoffbedarf (Biochemical Oxygen Demand, BOD) – und pathogene Schadstoffe – gemessen als Konzentration coliformer Bakterien (Fecal Coliform, FC) – wird in einigen Regionen der Erde, vor allem Europa und Teilen Nordamerikas sowie Asiens unabhängig vom Zukunftsszenario sinken. Dagegen wird sie vor allem in Subsahara-Afrika stark ansteigen. Grund ist ein hohes Bevölkerungs- aber schwaches Wirtschaftswachstum und damit verbundene steigende Wasserentnahmen und Schadstoffemissionen in die Gewässer (Jones et al., 2023).

Ein weiterer Indikator für Wasserverschmutzung ist die anorganische Belastung, die vor allem aus Salzen besteht. Sie wird als Menge der im Wasser gelösten Feststoffe (Total Dissolved Solids, TDS) gemessen, und wird bis 2100 vor allem im Zukunftsszenario SSP3-RCP7.0 „regionale

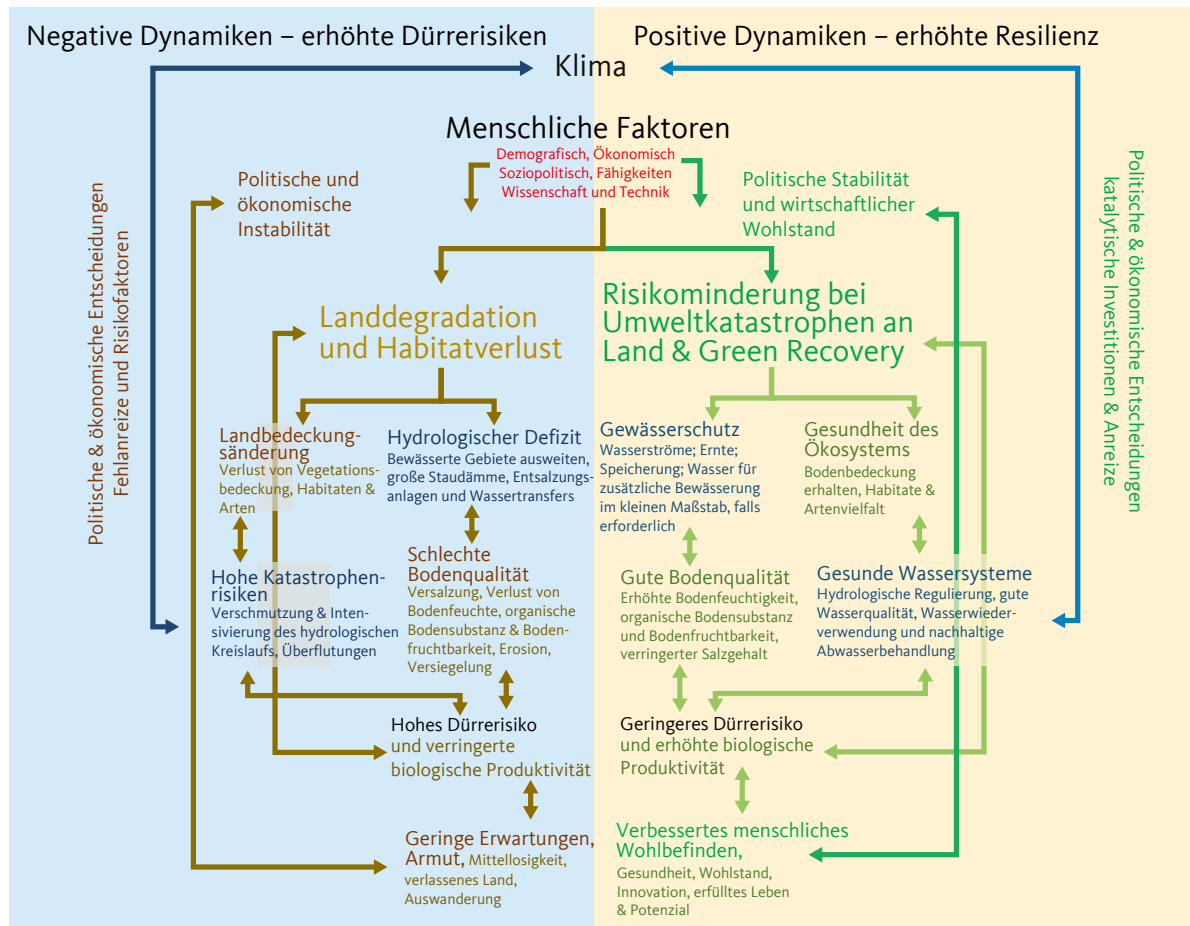


Abbildung 3.1-8

Dürreereignisse: Dynamiken. Schematische Darstellung der Dynamiken, die zum vermehrten Auftreten von Dürreereignissen führen (links) und von Dynamiken, die die Widerstandsfähigkeit erhöhen können (rechts). Ein resilienzfördernder Faktor ist z. B. die Anwendung nachhaltiger Landbewirtschaftungsmethoden, allerdings nur im Falle erfolgreichen Klimaschutzes.
 Quelle: Reichhuber et al., 2022; King-Okumu, 2021; Niemeijer et al., 2005

Rivalität“ in vielen Regionen ansteigen (Kap. 4.5; Jones et al., 2023). Abb. 3.1-9 zeigt die projizierten globalen Veränderungen der Wasserverschmutzung bis zum Jahr 2100.

3.1.4.2

Der Einfluss des Klimawandels auf Wasserverschmutzung

Als Folge des Klimawandels verschärfen die Veränderungen von Niederschlagsmustern (Konapala et al., 2020), Schneeschmelze-Abflussregimen (Kraaijenbrink et al., 2021) sowie die Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen wie Dürren oder Überschwemmungen (Caretta et al., 2022) die bestehende Situation (Kap. 3.1.1, 3.1.2). In Dürreperioden kann die Konzentration von Schadstoffen in Oberflächengewässern nicht mehr ausreichend verdünnt werden (Karakurt et al., 2019). Durch Überschwemmungen und das Abschmelzen von Schnee und Eis werden Schadstoffe

mobilisiert und damit bioverfügbar (van Vliet et al., 2023). Zusätzlich beeinflussen steigende Wassertemperaturen in Hitzewellen die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Oberflächengewässern, die sich auf die Konzentration und die chemischen Eigenschaften transportierter Stoffe auswirken können (Jones et al., 2023; Bosmans et al., 2022; Bonet et al., 2023; Capon et al., 2021). Erwärmung senkt die Konzentration von gelöstem Sauerstoff, was insbesondere bei zusätzlicher Sauerstoffzehrung durch starke organische Belastung der Gewässer unter anderem zu Fischsterben führen kann (van Vliet et al., 2023). Außerdem können höhere Temperaturen und reduzierte bzw. fehlende Niederschläge zur Aufkonzentrierung von Schadstoffen durch Verdunstung führen und chemische Verwitterung beschleunigen (Kaushal et al., 2021). Insgesamt resultiert zusammen mit dem unkontrollierten Klimawandel eine extreme, kaum kontrollierbare Belastungssituation für die Wasserressourcen und damit für Mensch und Natur.

Dies zeigt, wie unzureichend eingegrenzter Klimawandel die Auswirkungen weiterer Umweltbelastungen verstärkt und umgekehrt.

3.1.4.3

Wasserverschmutzung durch Mikroplastik

Ein Beispiel für Stoffeinträge in Gewässer und mögliche Wechselwirkungen von Stoffen mit Organismen ist Mikroplastik. Mikro- und Nanoplastik wirken beispielsweise als Vektor für zusätzliche schädliche Kontaminanten mit potenziell schweren Folgen für Umwelt und Gesundheit. So gibt es etwa bereits Hinweise auf eine gesteigerte Mortalitätsrate bei Zebrafischen und Atemwegserkrankungen beim Menschen (Kap. 2.3.4.4; Barreto et al., 2023; Kumar et al., 2023b). Die Belastung durch Mikro- und Nanoplastik wird sich vermutlich verschärfen: In einem Zukunftsszenario ohne Gegenmaßnahmen ist global bis zum Jahr 2060 eine Verdopplung des in die Umwelt eingebrachten Plastiks, und somit auch des Mikro- und Nanoplastiks, auf 44 Mio. t pro Jahr zu erwarten (OECD, 2022b).

3.1.4.4

Chemikalienbelastung durch steigenden Rohstoffbedarf

Der steigende Materialbedarf für Technologien wie für erneuerbare Energien führt zu einem wachsenden Rohstoffabbau der notwendigen Materialien wie Kupfer und Lithium (Europäische Kommission, 2020b; Bogardi et al., 2021; Raabe, 2023). Der Rohstoffabbau hat negative Auswirkungen auf lokale Gewässer, z. B. durch Eintrag von Prozesschemikalien, sowie hydrologische Veränderungen mit Folgen für Mensch und Umwelt (Kap. 2.3.4.6; WBGU, 2023). In Chile beispielsweise befinden sich heute etwa 80 % der Kupferproduktionsstätten in Gebieten, die extrem hohem Wasserstress ausgesetzt sind. Bis 2040 werden sich voraussichtlich 100 % der Produktionsstätten in solchen Gebieten befinden (Deleavingne et al., 2020).

Die Wasserproblematik in teilweise ohnehin wasserarmen Regionen wird durch den steigenden Rohstoffabbau und, wie oben beschrieben, durch die Folgen des Klimawandels verschärft (Bogardi et al., 2021; siehe auch Kap. 7 zu den Folgen des Abbaus und der Nutzung fossiler Energieträger und von Rohstoffen für die Energiewende). Die negativen Folgen des Rohstoffabbaus können durch Rückgewinnung von Metallen und weiteren Stoffen aus Industrieabwässern und End-of-Life-Produkten durch zirkuläre, wasserschonende Prozesse reduziert werden (Kap. 7).

3.1.4.5

Nährstoffe und schädliche Algenblüte

Die Eutrophierung von Gewässern durch zu hohe Konzentrationen von Stickstoff- und Phosphorverbindungen ist bereits heute auf einem kritischen Niveau (Rockström et al., 2023a). Aufgrund von Verschmutzungen durch Stickstoffverbindungen vor allem aus der Landwirtschaft könnte sich die Süßwasserknappheit in Flüssen bis 2050 weltweit bereits verdreifachen und zur Trinkwasserknappheit für die Bevölkerung führen. Dies zeigt ein Szenario, das zusätzlich zur Wasserquantität auch die Qualität in Bezug auf Wasserknappheit betrachtet (Wang et al., 2024).

Die Emissionen von Stickstoffverbindungen werden zum großen Teil durch den erwarteten zunehmenden Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft weiter ansteigen (Glibert, 2020; Wang et al., 2024). Damit verbunden könnte die Wasserproblematik durch schädliche Algenblüten verschärft werden, die u. a. Toxine produzieren und den für andere Organismen wichtigen Sauerstoff im Wasser verbrauchen (Griffith und Goble, 2020; CDC, 2024). Wird die Algenblüte zu dicht, verhindert sie die für das Phytoplankton überlebenswichtige Aufnahme der Sonnenstrahlung (CDC, 2024). Schädliche Algenblüten werden aufgrund der steigenden

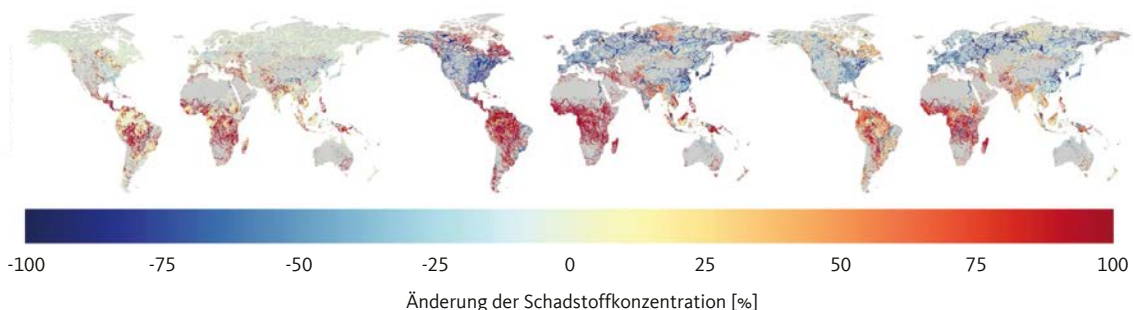


Abbildung 3.1-9

Wasserverschmutzung. Gezeigt sind Veränderungen der Oberflächenwasserqualität unter klimatischen und sozioökonomischen Veränderungen im Szenario SSP3-RCP7.0 mit hohen Treibhausgasemissionen (rot: Zunahme, blau: Abnahme der Schadstoffkonzentration). Zusammengestellt sind die Veränderungen der Schadstoffkonzentrationen von gelösten Feststoffen (TDS, links), des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BOD, Mitte), und der coliformen Bakterien (FC, rechts) als Indikatoren für die Versalzung und Anreicherung organischer sowie pathogener Schadstoffe.

Quelle: Jones et al., 2023

Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen bzw. der Änderung ihrer Verhältnisse zueinander häufiger und auch aufgrund steigender Temperaturen und lang andauernder Hitzeperioden zunehmen. Dies ist besonders in Südostasien sowie einigen Ländern Südamerikas und Afrikas zu erwarten (Glibert, 2020). Durch die Algenblüte und deren schädliche Folgen für die Ökosysteme im Süßwasser kann das Wasser nur mit erheblichem Aufwand als Trinkwasser aufbereitet werden (CDC, 2024; Glibert, 2020; Cressey, 2017). Projekte wie die Installation von kanalüberspannenden Photovoltaikanlagen (Over-canal Solar Photovoltaic Arrays) und ähnliche Konzepte für Seen können das Algenwachstum und die Verdunstung durch Beschattung verringern.

3.2 Verschärfungen durch sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen

Während das Wasserdargebot durch die Auswirkungen des Klimawandels und zunehmender Verschmutzung zukünftig vielerorts variabler und knapper wird (Kap. 3.1), deuten Studien gleichzeitig darauf hin, dass die Wassernachfrage global insgesamt steigen und in vielen Regionen zur Verschärfung von Wasserstress beitragen wird (Kap. 3.2.1). Mangelnde Wasserverfügbarkeit kann ein limitierender Faktor für Wachstum, Entwicklung und Armutsbekämpfung sein (Kap. 3.2.1). Multidimensionale Armut und soziale Ungleichheiten sowie Autokratisierungs- und Polarisierungsprozesse und geopolitische Interessen schwächen den gesellschaftlichen Zusammenhalt, befördern die Fragmentierung von Governance-Systemen und mindern gesellschaftliche Widerstandsfähigkeit gegenüber wasserbezogenen Krisen wie Dürren und Überschwemmungen (Kap. 3.2.2). Sie begünstigen so die Entstehung wasserbezogener Notlagen zusätzlich (Kap. 4).

3.2.1 Übernutzung von Wasserressourcen und Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen auf wirtschaftliche Entwicklung

Wasserbezogene Probleme verschärfen sich insbesondere in jenen Weltregionen, in denen eine steigende Wassernachfrage für wirtschaftliche oder gesellschaftliche Belange auf ein sinkendes oder stärker schwankendes Wasserdargebot trifft. Hier verringern sich Handlungsspielräume, um Ziele wie Zugang zu sicherem Trinkwasser und Sanitärversorgung für alle sowie Ernährungssicherheit zu erreichen, drastisch. Der fortschreitende Klimawandel wird zu verstärkten Schwankungen, und

in manchen Regionen zu einer Verringerung des Wasserdargebots führen (Graham et al., 2020a; Koutroulis et al., 2019; Kap. 3.1.1). Zunehmende Verschmutzung wird ohne Gegenmaßnahmen das Wasserdargebot zusätzlich einschränken (Kap. 3.1.4).

Dem gegenüber steht die Entwicklung der Wassernachfrage. Die Prognose zukünftiger Nachfragetrends ist schwierig und mit Unsicherheiten behaftet, da sie von der Entwicklung der technologischen, sozioökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen in den betrachteten Ländern und Regionen abhängt. Der Mensch beeinflusst diese Rahmenbedingungen und damit die Nachfrageentwicklung zudem direkt ebenso wie indirekt über den Klimawandel. Welche Szenarien der Realität am nächsten kommen, hängt entsprechend von unserem Handeln und der Reaktion der natürlichen Systeme ab. Studien zur Entwicklung der Wassernachfrage deuten darauf hin, dass sie global gesehen steigen und in vielen Regionen zur Verschärfung von Wasserstress beitragen wird (Kap. 3.2.1.1).

Handel mit virtuellem Wasser kann zum zunehmenden Wasserstress beitragen (Kap. 3.2.1.2). Mangelnde Wasserverfügbarkeit, zunehmende Variabilität und Extremereignisse beeinflussen das Potenzial für wirtschaftliche Entwicklung (Kap. 3.2.1.3) und damit nicht zuletzt auch soziale Ungleichheiten und geopolitische Entwicklungen (Kap. 3.2.2) sowie die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen (Kap. 3.3). Nur konsequentes Handeln von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft kann Handlungsspielräume offenhalten, negative Auswirkungen mindern und Mensch und Ökosystemen die Möglichkeit geben, sich an die begrenzte Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen anzupassen. Allerdings sind auch diesem Handeln natürliche Grenzen gesetzt (Kap. 5).

3.2.1.1 Steigende Wassernachfrage und -konsum

Die UNESCO (2023) schätzen, dass die gesamte globale Wassernachfrage jährlich um ca. 1 % und damit bis 2050 um 20–30 % zunehmen wird (siehe auch Caretta et al., 2022). Allerdings beträgt die Fehlerspanne für diese Berechnung mehr als 50 % (UNESCO, 2023). Auch kann es deutliche regionale Unterschiede in der Entwicklung der Wassernachfrage geben. Ein Großteil des erwarteten Anstiegs der Nachfrage entfällt auf Länder niedrigen und mittleren Einkommens, insbesondere Schwellenländer. Regionale Unterschiede in der Entwicklung der Wassernachfrage spiegeln sich ändernde Nutzungsmuster in den drei Bereichen Kommunen, Industrie und Landwirtschaft wider (UNESCO, 2023).

Zunahmen in der Nachfrage von Kommunen werden in vielen Regionen durch eine Ausweitung der Wasserversorgung, und zu einem geringeren Anteil der Wasserentsorgung, überhaupt erst ermöglicht. Sie sind daher stärker

in Regionen, in denen die Wasserver- und -entsorgung ausgeweitet wird (UNESCO, 2023).

Die industrielle Wassernachfrage stammt vor allem aus wasserintensiven Prozessen, z. B. in der Produktion oder in der Energieerzeugung. Zunahmen in der industriellen Wassernachfrage gehen daher in der Regel mit fortschreitender Industrialisierung einher. Effizienzsteigerungen in der Wassernutzung können die Wassernachfrage über die Zeit wieder sinken lassen (UNESCO, 2023).

Die Wassernachfrage in der Landwirtschaft ist vor allem durch die Bewässerung getrieben und abhängig von verschiedenen Faktoren, z. B. der Beschaffenheit der Böden, den Auswirkungen des Klimawandels, den angebauten Feldfrüchten bis hin zu den Anbaumethoden (UNESCO, 2023; Caretta et al., 2022). Auch Nutzungskonkurrenzen, Beschränkungen der Wasserverfügbarkeit, Konsummuster in Bezug auf Nahrungsmittel und der Handel spielen eine Rolle (UNESCO, 2023) sowie die steigende Nachfrage für Biomasse zur Energieerzeugung (Caretta et al., 2022). Je nach den zugrundeliegenden Annahmen, z. B. über die sozioökonomische, technische und klimatische Entwicklung, variieren Projektionen zur Entwicklung des Wasserbedarfs erheblich.

Der IPCC schätzt, dass der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts auf das Doppelte bis Dreifache zunehmen könnte (Caretta et al., 2022). Die Welternährungsorganisation (FAO) geht davon aus, dass sich der Wasserbedarf für die Bewässerung von Ackerpflanzen unter Berücksichtigung des Klimawandels bis 2050 gegenüber 2012 um mindestens 30 % erhöhen wird (FAO, 2022b). Steigende Bewässerungsbedarfe tragen neben erhöhter Evapotranspiration infolge des Klimawandels in Projektionen zur zunehmenden Erschöpfung von Grundwasservorkommen bis zum Ende des Jahrhunderts bei (Caretta et al., 2022; Kap. 3.1.1.3).

Steigende Wassernachfragen und infolgedessen steigende Wasserentnahmen bzw. -konsum werden Studien zufolge vor allem in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts global gesehen eine Hauptursache für zunehmenden Wasserstress sein, durch den sich wasserbezogene Probleme deutlich verschärfen können (Graham et al., 2020a; Wada und Bierkens, 2014; Distefano und Kelly, 2017; Abb. 3.2-1). Vor allem in urbanen Räumen wird die steigende Wassernachfrage aufgrund von Industrialisierungsprozessen und der demographischen und Einkommensentwicklung (und der damit verbundenen Ausweitung in der Wasserver- und -entsorgung) zu zunehmendem Wasserstress bzw. zunehmender Wasserknappheit beitragen (Caretta et al., 2022; He et al., 2021; World Bank, 2016a). Betroffen sind insbesondere Indien und der Nordosten Chinas (Kap. 4.2) sowie viele Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen, insbesondere in Afrika, Teilen Asiens sowie Zentral- und Südamerika (Graham et al., 2020a; Wada und Bierkens, 2014).

Trotz großer Unsicherheiten bezüglich regionaler Klimaveränderungen ist in vielen Flusseinzugsgebieten ebenfalls eine Verringerung des Wasserdargebots wahrscheinlich. Dies kann selbst dann der Fall sein, wenn die Prognose im Mittel für das Flusseinzugsgebiet auf eine Ausweitung des Wasserdargebots infolge des Klimawandels hindeutet. Das abnehmende Wasserdargebot verschärft den Effekt steigender Wassernachfragen (Caretta et al., 2022).

Um bestehende Missverhältnisse zwischen Wassernachfrage und -dargebot nicht weiter eskalieren zu lassen, reicht es nicht aus, allein auf technologischen Wandel zu setzen. Die meisten der Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) nehmen Wachstumsraten an, welche viele Länder ohne Erschöpfung ihrer Wasserressourcen und ohne vollständige Abhängigkeit von Wasserimporten nur erreichen können, wenn sie technischen Fortschritt mit historisch bisher nicht beobachteter, möglicherweise unrealistischer Geschwindigkeit vorantreiben (Distefano und Kelly, 2017). Eine Transformation des weltweiten Umgangs mit Wasser durch Vorsorge- und vorausschauende Anpassungsmaßnahmen ist daher notwendig (Kap. 5).

3.2.1.2

Künftiger Handel mit wasserintensiven Gütern: Beispiel Agrargüter

Angesichts der steigenden Wassernachfrage bei gleichzeitig vielerorts abnehmendem Wasserdargebot ist zu erwarten, dass sich der Handel mit virtuellem Wasser intensivieren wird. Es gibt jedoch nur wenige Projektionen, die wie Graham et al. (2020a) umfassend Entwicklungen auf globaler, regionaler und Flusseinzugsgebietsebene abbilden – für blaues und grünes Wasser, Oberflächenwasser, Grundwasser und nicht erneuerbares Grundwasser unter Berücksichtigung von Klimawandel und sozioökonomischer Entwicklung.

Graham et al. (2020b) untersuchen, wie ein Großteil der Literatur zu virtuellen Wasserströmen (Kap. 2.3.1), den Handel mit Agrarprodukten. Sie zeigen unter Annahme eines Business-as-usual-Szenarios, dass sich Exporte von in Agrarprodukten enthaltenem grünem und blauem Wasser global bis 2100 im Vergleich zu 2010 jeweils verdreifachen könnten (von 905 Mrd. m³ und 56 Mrd. m³ auf 3.200 Mrd. m³ und 170 Mrd. m³). Während Graham et al. dies primär auf steigende Nachfragen aufgrund von Bevölkerungswachstum zurückführen, wäre die Betrachtung weiterer sozioökonomischer und Klimaszenarien notwendig, um robuste Aussagen zum Einfluss sozioökonomischer Entwicklung und des Klimawandels auf zukünftige virtuelle Wasserexporte zu treffen. Die Autoren erwarten eine Verschiebung virtueller Wasserströme, welche einer Verschiebung der weltweiten Nahrungsmittelproduktion folgt: In Regionen mit bedeutender landwirtschaftlicher Produktion zeigen

3 Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

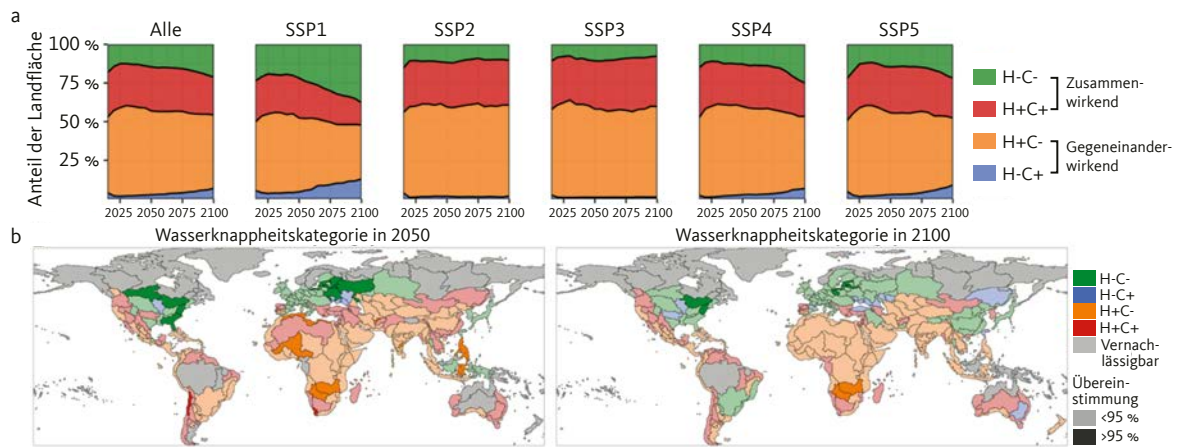


Abbildung 3.2-1

Räumliche und zeitliche Darstellung der Einflussfaktoren sich verändernder Wasserknappheit. (a) Zeitliche Veränderungen des Anteils der Landfläche, auf welchem die gleichzeitigen Auswirkungen von menschlichen und klimatischen Systemen auf Veränderungen der Wasserknappheit nach Komponente und Vorzeichen der Veränderung dargestellt sind, für verschiedene sozio-ökonomische Pfade (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). Wasserknappheit wird gemessen durch den Water Scarcity Index als Verhältnis aus Wasserentnahmen aus allen Quellen (erneuerbarer Oberflächenabfluss, nicht erneuerbares Grundwasser, Entsalzung) zum gesamten, durch General Circulation Model (GCM) ermittelten zugänglichen Oberflächenabfluss. Das Szenario „Alle“ stellt die Gesamtheit aller Landflächen über alle 75 betrachteten Szenarienkombinationen aus SSP, Representative Concentration Pathway (RCP) und GCM dar. (b) Wasserknappheitskategorie im Jahr 2050 (links) und 2100 (rechts). Ein (+) steht für steigende Wasserknappheit, entweder durch menschlichen Einfluss (H) oder Klimawandel (C) und ein (-) für abnehmende Wasserknappheit. (z. B. H+ C+: Menschlicher Einfluss und Klimawandel führen beide zu einer Zunahme der Wasserknappheit in einem bestimmten Einzugsgebiet). Die Robustheit der Ergebnisse wird durch den Grad der Schattierung angezeigt: Dunklere Farbe kennzeichnet mehr als, hellere Farbe weniger als 95 % Übereinstimmung über alle 75 SSP-RCP-GCM-Szenarien. Einzugsgebiete, in denen vernachlässigbare Veränderungen der Wasserknappheit beobachtet wurden, sind als solche schattiert, wenn mindestens 95 % der Szenarien für dieses bestimmte Becken übereinstimmen. Alle Becken, in denen dies nicht der Fall ist, sind entsprechend ihrer Knappheitskategorie in den nicht vernachlässigbaren Szenarien schattiert.

Quelle: Graham et al., 2020a

die Projektionen von Graham et al. (2020b) zwischen 2050 und 2100 eine deutliche Intensivierung von Blau- und Grünwasserexporten. Es fehlt eine Einschätzung der potenziellen Umweltauswirkungen dieser erwarteten Intensivierung und Verschiebung im Handel mit virtuellem Wasser, denn Graham et al. erfassen virtuelle Wasserströme rein volumetrisch.

Viele Länder decken ihren Bewässerungsbedarf bereits zunehmend aus Grundwasser, das teilweise nicht erneuerbar ist (Kap. 2.2.3.1). Da das Dargebot an Oberflächenwasser variabler und vielerorts knapper wird, ist zu erwarten, dass sich auch dieser Trend fortsetzen wird, sofern nicht gegengesteuert wird, oder sofern nicht zunehmender Wassermangel weitere Grundwasserentnahmen begrenzt (Bierkens und Wada, 2019; Kap. 3.1.1.3). Handel mit nicht erneuerbarem Grundwasser (Summe der Importe und Exporte) könnte laut Graham et al. (2020b) bis zur Mitte des Jahrhunderts um das Fünffache steigen. Exportregionen sind insbesondere die USA, Mexiko, Südamerika und Nordafrika sowie, auf der Flusseinzugssebene, der Nil, der Rio de la Plata und das Murray-Darling Basin (Abb. 3.2-2 e und f). Nicht erneuerbares Grundwasser

wird z. B. entlang der zuvor genannten Flussläufe für landwirtschaftliche Bewässerung zur Erzeugung von Grundnahrungsmitteln wie Reis und Mais für den Export genutzt (Graham et al., 2020b). Gemäß der Projektion von Graham et al. (2020b) ist für den Handel mit virtuellem Wasser nach dem Anstieg in der ersten Hälfte des Jahrhunderts eine Abnahme für die zweite Hälfte des Jahrhunderts zu erwarten, da Exporte aus wasserarmen Regionen mit zunehmender Erschöpfung ihrer Ressourcen zurückgehen werden (Graham et al., 2020b).

Länder, deren Importe zum großen Teil aus Ländern und Regionen stammen, die ihre Wasserressourcen nicht nachhaltig nutzen, setzen sich dem Risiko aus, von zunehmendem Wasserstress in den Exportregionen indirekt betroffen zu werden (Sartori et al., 2017). Gerade Länder, die von Nahrungsmittelimporten abhängig sind, sind potenziell vulnerabel (Kap. 2.2.3), da abnehmende und zunehmend variable Wasserressourcen in Exportländern die Ernährungssicherheit in den Importländern gefährden und diese in eine Notlage bringen können. Zum Ende des Jahrhunderts werden Graham et al. zufolge vor allem Ost- und Westafrika sowie Indien ihren

Nahrungsmittelbedarf nicht aus eigener Produktion decken können und Agrarprodukte und darin enthaltenes (vorwiegend grünes) Wasser importieren. Indien könnte zudem – zusammen mit Pakistan und dem mittleren Osten – zu den größten Nettoimporteuren von blauem Wasser und nicht erneuerbarem Grundwasser gehören (Graham et al., 2020b).

Andererseits zeigen Simulationen von Gouel und Laborde (2021), dass Handel dazu beitragen kann, Wohlfahrtsverluste klimawandelbedingter Änderungen landwirtschaftlicher Erträge abzufedern, indem er Ländern ermöglicht, landwirtschaftliche Produkte, deren Produktivität durch den Klimawandel sinkt, verstärkt zu importieren und ihre Produktion auf produktivere Alternativen umzustellen.

3.2.1.3

Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen auf wirtschaftliche Entwicklung und Armutsbekämpfung

Mangelnde oder zunehmend variable Wasserverfügbarkeit sowie Extremereignisse wie Dürren, Starkregen und Überschwemmungen beeinträchtigen Wachstum und Entwicklung. Bereits heute belaufen sich die Verluste infolge unzureichender Wasser- und Sanitärversorgung, Überflutungen in urbanen Räumen sowie Unsicherheit im Bereich Bewässerung auf jährlich rund 470 Mrd. US-\$ (Khemka et al., 2023). Laut Weltbank (2016) könnten wasserbezogene Auswirkungen des Klimawandels das globale Bruttoinlandsprodukt bis 2050 um 0,39 % (unter Annahme eines nachhaltigen Entwicklungspfads, SSP1) bis zu 0,49 % (in einem Szenario ohne Anpassung und mit wiederauflebendem Nationalismus und regionalen Rivalitäten, SSP3) reduzieren. Regional könnten Verluste deutlich größer ausfallen, etwa im Mittleren Osten (-14 %), der Sahelzone (-12 %), Zentralasien (-11 %) und Ostasien sowie Zentralafrika (-7 %). Die Höhe der zu erwartenden Schäden unterscheidet sich in Projektionen jedoch stark, je nach einbezogenen Sektoren, Schadensarten, Szenario- und Modellierungsannahmen (Caretta et al., 2022; Takakura et al., 2019).

Die Effekte von Wasser auf wirtschaftliche Entwicklung entstehen zum einen dadurch, dass Wasser ein wichtiger Produktionsfaktor ist, und Wasserknappheit insofern wirtschaftliche Aktivität behindert. Insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels ist Wasser als lokal und saisonal begrenzt verfügbare Ressource ein potenzielles Hindernis für Wachstum und Entwicklung – in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens (LMIC), aber auch in Hocheinkommensländern (HIC; Distefano und Kelly, 2017). Betroffen sind vor allem Regionen, die bereits unter Wasserstress leiden, wie der Mittlere Osten, die Sahelzone sowie Zentral- und Ostasien (World Bank, 2016a).

Zum anderen zerstören Extremereignisse wie Überschwemmungen Menschenleben und Vermögenswerte. Studien zeigen, dass Bruttoinlandsprodukte nach wasserbezogenen Katastrophen sinken und sich in den 20 darauffolgenden Jahren nicht erholen. Dies gilt für Hocheinkommensländer und Niedrigeinkommensländer gleichermaßen (World Bank, 2016a). Schäden durch Starkregen oder Überschwemmungen führen zu einem teilweisen oder vollständigen Verlust vorhandener Vermögenswerte. Die Folgen sind hohe Kosten für Bürgerinnen und Bürger und Unternehmen, die auf die Infrastrukturen angewiesen sind, sowie für private und öffentliche Investoren und Kapitalgeber, die finanziell an den Infrastrukturen beteiligt sind.

Laut Europäischer Umweltagentur verursachten wetter- und klimabedingte Extremereignisse in den EU-Mitgliedstaaten zwischen 1980 und 2021 wirtschaftliche Verluste in Höhe von schätzungsweise 560 Mrd. €, davon 56,6 Mrd. € im Jahr 2021 (EEA, 2023). Allein die jährlichen Schäden durch Überflutungen in Europa könnten sich gegenüber ca. 7 Mrd. US-\$ pro Jahr zwischen 1960 und 1990 bei gleichbleibendem Trend bis 2080 verdoppeln (World Bank, 2016a). Es wird geschätzt, dass der niederländische Finanzsektor in seinen Beteiligungsportfolios ein Gesamtrisiko von 83 Mrd. € an möglichen Schäden infolge wasserbezogener Naturkatastrophen enthält. Solche Risiken gefährden die Stabilität der Finanzinstitutionen und somit auch dringend benötigte Investitionen im Wassersektor (Schellekens und van Toor, 2019).

Unverhältnismäßig stark betroffen von den Auswirkungen wasserbezogener Katastrophen sind multidimensional arme Haushalte. Sie sind bereits heute bei der Verteilung von Wasserressourcen benachteiligt (Kap. 2.3.2). Ihre Häuser und Vermögenswerte sind vulnerabler und liegen häufig in Regionen mit höherem Risiko für wasserbezogene Katastrophen. Dies senkt die Anreize für Investitionen in physische Vermögenswerte wie z. B. Infrastruktur, die zerstört werden könnten.

Exposition gegenüber Extremereignissen sowie zunehmende Wasserknappheit und -variabilität, vor allem im Mutterleib und in der frühen Kindheit, können darüber hinaus wasserbezogene Krankheiten (Kap. 3.3.2), Einkommenseinbußen und Mangelernährung zur Folge haben (Cooper et al., 2019; Shively, 2017). Diese können dazu führen, dass weniger in die Fähigkeiten von Menschen investiert wird, insbesondere in die Fähigkeiten von Kindern, und Wachstum langfristig negativ beeinflussen (World Bank, 2016a).

Studien belegen vor allem für von der Landwirtschaft, insbesondere vom Regenfeldbau, abhängige Bevölkerung z. B. im ländlichen Vietnam, Indien, Indonesien oder Mexiko, aber auch für Menschen in urbanen Gebieten, z. B. in Ländern Lateinamerikas, dass wasserbezogene

3 Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

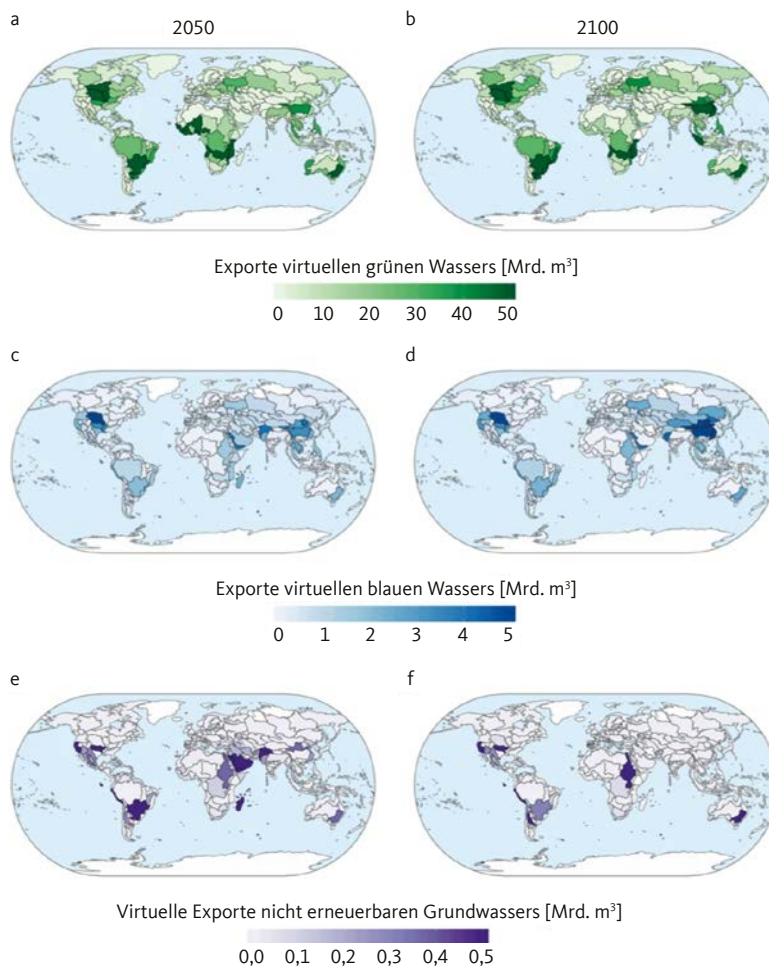


Abbildung 3.2-2

Prognose virtueller Wassereporte auf Ebene von Flusseinzugsgebieten in 2050 und 2100. Virtuelle Exporte von grünem Wasser in a (2050) und b (2100), virtuelle Exporte von blauem Wasser in c (2050) und d (2100) und virtuelle Exporte von nicht-erneuerbarem Grundwasser in e (2050) und f (2100), jeweils in Mrd. m³. Werte zeigen den Durchschnitt aus fünf Modellläufen für die Kombination aus Shared Socioeconomic Pathway 2 (SSP2) und Representative Concentration Pathway (RCP) 6.0. Alle Werte berücksichtigen lediglich Exporte landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Zusätzliche, möglicherweise notwendige virtuelle Wasserimporte sind nicht enthalten.

Quelle: nach Graham et al., 2020b

Schocks und Extremereignisse wie Dürren oder Überflutungen noch nach Jahrzehnten negative Auswirkungen auf Gesundheit, Bildung und Einkommen der betroffenen Personengruppen haben können (World Bank, 2016a; Caruso, 2017; Randell und Gray, 2019).

Sozioökonomische Trends wie steigende Nahrungsmittelbedarfe aufgrund von Bevölkerungswachstum oder geopolitische Entwicklungen können die Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen auf Wachstum und Entwicklung und insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen zusätzlich verstärken, das Risiko der Entstehung wasserbezogener und humanitärer Notlagen erhöhen und das Erreichen von SDG 1 „keine Armut“ gefährden. Dagegen können andere Faktoren wie bessere Institutionen und Infrastruktur sowie Zugang zu Märkten und eine stärkere Öffnung für den Handel und für internationale Kapitalströme die Auswirkungen von Extremereignissen und Variabilität im Wasserdargebot mildern (World Bank, 2016a; Shively, 2017; Cooper et al., 2019). Dies ist unter anderem der Fall, weil Nothilfe schneller und effektiver geleistet wird, weil die notwendigen Mittel

für den Wiederaufbau zerstörter Infrastruktur schneller bereitgestellt werden können oder auch weil Ausfälle in der Nahrungsmittelproduktion über Märkte und Importe abgedeckt werden können.

Und schließlich gibt es Evidenz dafür, z. B. aus Subsahara-Afrika, Brasilien und Indien, dass wasserbezogene Extremereignisse Konflikte innerhalb eines Landes befeuern und so Wachstum und Entwicklung hemmen (World Bank, 2016a). Wasser ist jedoch selten alleiniger Auslöser für Auseinandersetzungen zwischen Ländern, wenngleich es diese verschärfen kann (World Bank, 2016a). Das Pacific Institute (2023) schätzt die Zahl der Konflikte, in denen Wasser Auslöser, Waffe oder Opfer von Konflikten weltweit war, auf knapp 1.300. Kapitel 4.3.2.2 schildert den Zusammenhang zwischen Wasser und Konflikten exemplarisch am Beispiel der MENA-Region.

Schätzungen der Weltbank zeigen, dass die zu erwartenden Verluste sich drastisch verringern, möglicherweise sogar vermieden werden können, wenn Regierungen auf Wasserknappheit reagieren in dem sie die Effizienz verbessern und Wasser dorthin umverteilen, wo es den

höchsten Nutzen bringt. In Regionen mit sehr großer Wasserknappheit wie Zentral- und Ostasien sind jedoch auch mit besserem Wassermanagement Verluste von mehr als 5 % des Bruttoinlandsprodukts zu erwarten. In diesen Regionen sind tiefgreifendere politische Maßnahmen und Reformen notwendig, um den projizierten Auswirkungen des Klimawandels zu begegnen (World Bank, 2016a).

3.2.2

Soziale Ungleichheiten und geopolitische Machtverschiebungen

Wasserverfügbarkeit und -qualität hängen auch von Nutzungsformen, Siedlungsstrukturen und Verteilungsinfrastrukturen ab. Das Management der Ressource, eingebettet in einen größeren Governancerahmen zur politisch-gesellschaftlichen Steuerung, bedingt ihre nachhaltige Nutzung, ist gleichzeitig aber abhängig von den klimatischen, geologischen und topographischen Voraussetzungen (Huggins et al., 2022).

Soziale Polarisierungsprozesse schwächen gesellschaftlichen Zusammenhalt, befördern die Fragmentierung von Governancesystemen – im Bereich des Wassermanagements insbesondere bezüglich formaler und informeller, nicht staatlicher Wassergovernance – und schwächen gesellschaftliche Widerstandsfähigkeit: zum einen gegenüber plötzlichen Katastrophen wie Überschwemmungen, zum anderen gegenüber schleichenden Katastrophen (creeping disasters) wie langanhaltenden Dürreperioden oder dem sukzessiven Zerfall von Bewässerungsinfrastrukturen (Abb. 3.2-3; Huggins et al., 2022; Kap. 2.3.2).

Im Folgenden wird näher auf die gesellschaftlichen Dimensionen der sich verschärfenden Wasserkrise eingegangen, insbesondere auf die sich zuspitzenden Effekte von Autokratisierungs- und Polarisierungsprozessen, geopolitischen Interessen und multidimensionaler Armut sowie sozialen Ungleichheiten.

3.2.2.1

Geopolitische Verschärfungen

Polarisierung und Autokratisierung erschweren internationale Kooperationen zu Wasser

Da Wasser in Kreisläufen zirkuliert ist das Management von Wasser und biologischen Ressourcen häufig eine politische Grenzen überschreitende Aufgabe (Huitema und Meijerink, 2017). Gerade in Zeiten zunehmender geopolitischer und auch sicherheitspolitischer Spannungen ist dies von Relevanz. Seit Jahren ist eine Zunahme sozialer Polarisierungsprozesse in Ländern aller Kontinente und aller Einkommensgruppen (Niedrig-, Mittel- und Hoheinkommensländern) zu beobachten.

In zahlreichen Ländern gehen diese auch mit politischen Autokratisierungsprozessen (Nord et al., 2024; Nowack und Leininger, 2022) einher. Auf Ebene multilateraler Politikgestaltung bewirkt dies auch eine Autokratisierung internationaler Verhandlungen, beispielsweise im Rahmen des UN Sicherheitsrats oder der UN Generalversammlung (Kloke-Lesch und Hornidge, 2023; Lührmann und Lindberg, 2019; Emmons, 2020). Aktuelle Beispiele umfassen die Auseinandersetzungen zum Krieg Israels in Gaza nach den Terrorangriffen der Hamas am 7. Oktober 2023 ebenso wie zum russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine.

Im Bereich grenzüberschreitenden Wassermanagements oder auch wasserbezogener multilateraler Verhandlungen stellen die zunehmenden geopolitischen Spannungen eine zusätzliche Verschärfung der Lage dar. Beispiele finden sich im grenzüberschreitenden Wassermanagement entlang der Grenzen Chinas und Indiens oder in Teilen Zentralasiens, ebenso wie im Nahen Osten oder entlang der Grenze zwischen den USA und Mexiko. Auf Ebene multilateraler Wassergovernance erschwert die Tatsache, dass einige Länder wie beispielsweise Südafrika oder auch die Mongolei die Vereinbarung globaler Normen und Regeln gemeinsamer Wasserpolitik als nicht akzeptablen Einschnitt in ihre staatliche Souveränität betrachten, die entsprechende weitere Ausgestaltung (Dombrowsky et al., 2022b).

Damit verhindern sie die Entwicklung gemeinsamer globaler oder auch regionaler Ansätze und Lösungen für die Beseitigung von Wasserknappheit und -verschmutzung, die angesichts der Auswirkungen globaler Umweltveränderungen auf die lokale und regionale Dimension dieser Probleme notwendig sind.

Ein Anstieg politischer Autokratisierung kann die Umsetzung partizipativer und auf Interessensausgleich und Verteilungsgerechtigkeit angelegter Ansätze des Wassermanagements sowie ein nachhaltiges Ressourcenmanagement erschweren. Der Wettstreit um Grundwasser zwischen Landwirt:innen und der Zentralregierung in Azraq, Jordanien ist ein Beispiel für ein nicht nachhaltiges Ressourcenmanagement durch ein moderat autokratisches Regime und deutet auf mögliche Grenzen autokratisch geprägter Systeme für eine sozial-ökologische Transformation hin (Dombrowsky et al., 2022a; Hornidge et al., 2013). Auch ein stark hierarchisch geprägtes Wassermanagement scheint einer nachhaltigen Wassernutzung in vielen Fällen nicht zuträglich zu sein, da es die dafür wichtige Koordination verschiedener Sektoren und Akteure erschwert (Lukat et al., 2023; Hornidge et al., 2013).

3.2.2.2

Soziale Ungleichheiten, Armut und Machtungleichgewichte verschärfen ungleiche Verteilung und Übernutzung von Wasser

Sauberes Wasser ist nicht nur ein knappes und begehrtes, sondern auch ein sehr ungleich verteiltes Gut. Wassergovernance ist folglich geprägt von sehr unterschiedlichen Akteurskonstellationen und Interessenslagen zwischen unterschiedlichen sozialen Kontexten, Ländern, Regionen

sowie unterschiedlichen Governanceebenen. Insbesondere in einigen Ländern der Subtropen und Gegenden mit hoher Wasserknappheit verschärft häufig ungleiche Wasserverteilung die Wassernotlagen.

Calow und Mason (2014) weisen darauf hin, dass Wasserkrisen häufig nicht auf fehlende Verfügbarkeit, sondern vielmehr auf ungleiche Verteilung zurückgehen. Neben Ungleichheit werden auch stark ungleich verteilte politische und ökonomische Macht und Armut als zentrale

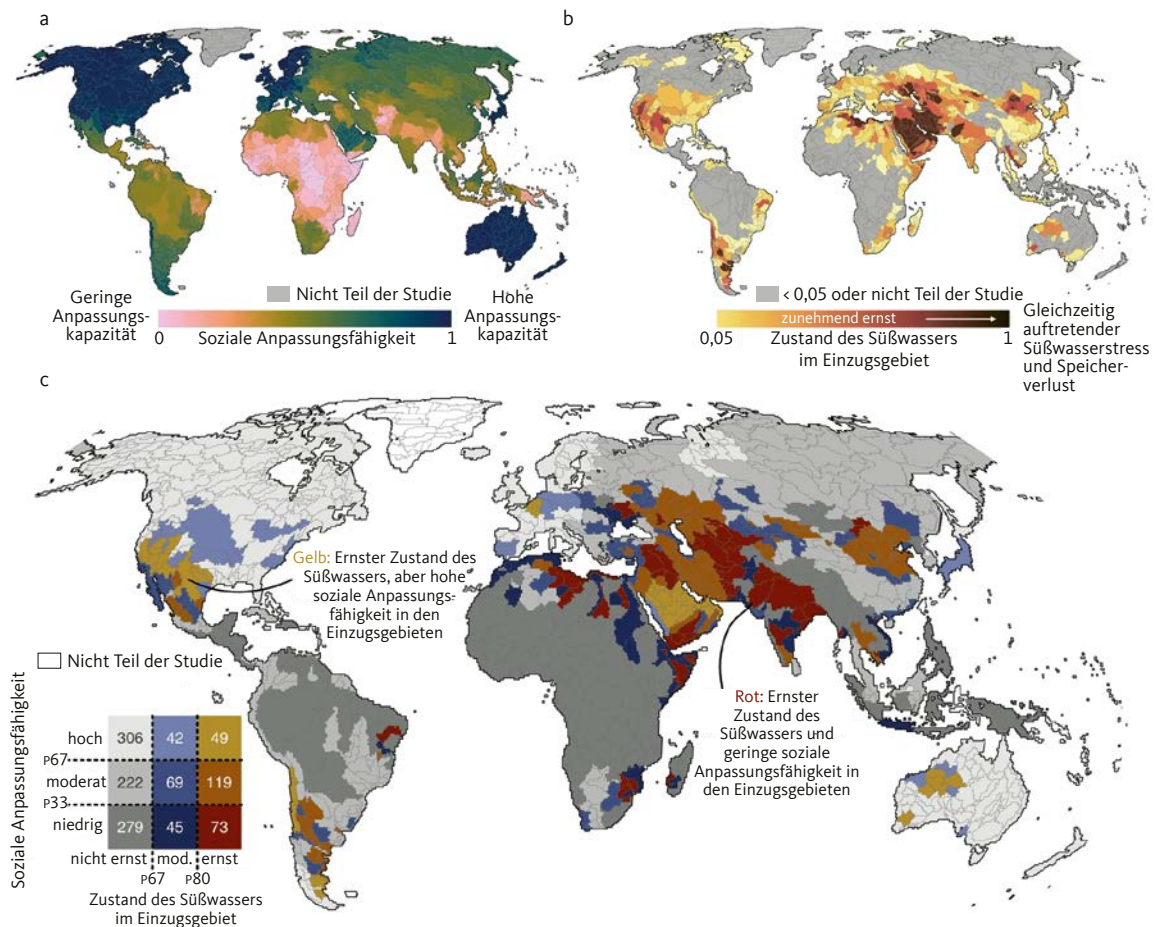


Abbildung 3.2-3

Die Beziehung zwischen dem Süßwasser-Status (Kombination aus Süßwasser-Stress und Speichertrend pro Einzugsgebiet) eines Einzugsgebiets und der sozialen Anpassungsfähigkeit. a) Soziale Anpassungsfähigkeit im Einzugsgebiet. b) Zustand des Süßwassers im Einzugsgebiet. c) Kombination aus Zustand des Süßwassers im Einzugsgebiet und sozialer Anpassungsfähigkeit. Quelle: Huggins et al., 2022

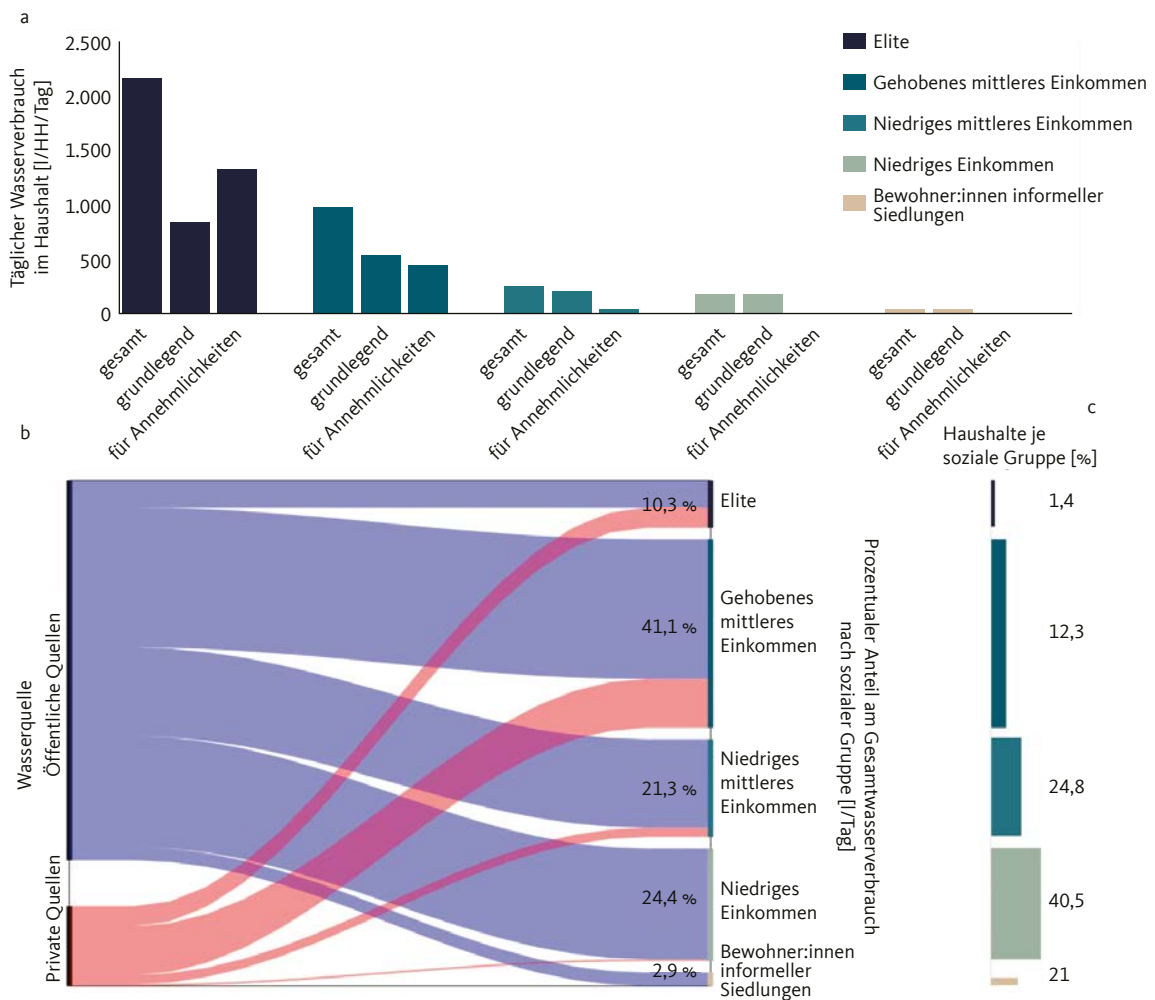


Abbildung 3.2-4

Modellierter Wasserverbrauch in Kapstadt nach gesellschaftlichen Gruppen. a) Täglicher Wasserverbrauch nach gesellschaftlicher Gruppe in Litern pro Haushalt und Tag. b) Anteil des Wasserverbrauchs nach gesellschaftlicher Gruppe am Gesamtwasserverbrauch. c) Anteil der Gesamthaushalte an der jeweiligen gesellschaftlichen Gruppe.

Quelle: Savelli et al., 2023: 931

Faktoren in der globalen Wasserkrise gewertet (Calow und Mason, 2014). Die ungleiche Verteilung von Wasser und die Übernutzung der Wasserressourcen wird unter anderem am erhöhten Wasserverbrauch einkommensstärkerer Bevölkerungsgruppen in urbanen Räumen deutlich. In Kapstadt verbrauchen z.B. die reichsten 14 % der Einwohner:innen 51 % des städtischen Wassers, während Haushalte mit geringem Einkommen und in informellen Siedlungen, die 62 % der städtischen Bevölkerung ausmachen, nur 27 % des Wassers verbrauchen (Abb. 3.2-4; Savelli et al., 2023). Gleichzeitig sind es die gesellschaftlich schlechter gestellten Gruppen und informellen Siedlungen, die häufig nicht über die

entsprechenden Infrastrukturen verfügen, um beispielsweise Starkregen aufzufangen oder abzuleiten, oder den Zugang zu Wasser über längere Trockenzeiten hinweg sicherzustellen. Die Betroffenheit durch die zunehmende Verschränkung von klimatischen Veränderungen und gesellschaftspolitischen Gegebenheiten nimmt somit stetig zu. Die bereits vulnerablen und von Ungleichheiten geprägten Gruppen, wie Mädchen und Frauen, multidimensional arme Menschen (multidimensionale Armut geht über die Bemessung des Einkommens hinaus und bezieht Bildung, Gesundheit und Lebensstandard mit ein, siehe Kapitel 2) und Kinder, werden durch eine ungleiche Verteilung von Wasser weiter benachteiligt

und bestehende Wasserprobleme nehmen zu (Schleifer und Otto, 2019). Klimatisch und ökologisch bedingte Verfügbarkeitsprobleme von Wasser und Verteilungsdefizite verstärken sich gegenseitig.

3.3

Konsequenzen und Verschärfungen durch Gesundheitsschäden bei Arten, Ökosystemen und Menschen

Die zunehmende Klimakrise und Verschmutzung und die damit einhergehenden Auswirkungen auf hydrologische Prozesse, Umweltbedingungen und nicht zuletzt auf die Biodiversität werden direkte und indirekte Folgen für die menschliche Gesundheit (Kap. 3.2.2) sowie auf die Gesundheit anderer Organismen und – damit einhergehend – Auswirkungen auf die Funktionalität und Artzusammensetzung der Ökosysteme (Kap. 3.2.1) haben. Die Bedrohung reicht von Einschränkungen der Leistungsfähigkeit des Individuums, auch des Menschen, durch physiologische Effekte und Infektionen bis hin zu Verlusten von Lebensräumen sowie negativen Auswirkungen auf den Zusammenhalt und die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen und Gesellschaften, auch für die Stabilisierung des genutzten Wasserhaushalts (Capon et al., 2021; Caretta et al., 2022; Scherer et al., 2023; Albert et al., 2021).

3.3.1

Auswirkungen auf Süßwasserökosysteme, Organismen und Biodiversität

Süßwasserökosysteme weltweit sind bereits erheblich und irreversibel geschädigt und in ihrer Funktionalität und der Bereitstellung von Ökosystemleistungen zunehmend eingeschränkt (WBGU, 2023; IPCC, 2022a, 2023b; Kap. 2.2.1). Auch sind etliche dieser Ökosysteme durch Trockenlegung bereits in großem Ausmaß verloren gegangen; die verbleibenden Systeme sind durch die Kombination der verschiedenen Verschärfungen (Kap. 3.1, 3.2) weiterhin gefährdet. Ohne wirksame Gegenmaßnahmen werden sich diese negativen Veränderungen wie z. B. die Einschränkungen der Wasserverfügbarkeit und -qualität sowie Verluste der Existenz und Resilienz der aquatischen Ökosysteme weiter fortsetzen (Abb. 3.3-1).

Alle Ökosysteme, sowohl aquatisch als auch terrestrisch, tragen zum globalen Wasserkreislauf bei (Kap. 2.1). Insbesondere Süßwasserökosysteme sind zunehmend bedroht, ihre Degradierung erfolgt bereits und wird ohne Trendumkehr auch in Zukunft schneller erfolgen als die von terrestrischen Ökosystemen (Abb. 3.3-1; Albert et al., 2021; Vari et al., 2022). Süßgewässer weltweit sind

besonders vom globalen Temperaturanstieg betroffen, da sowohl die Wasserqualität als auch die Wassermenge stark von den atmosphärischen Temperaturverhältnissen beeinflusst werden. Dies wird noch weiter verschärft durch den im Vergleich zu anderen Ökosystemtypen unverhältnismäßig hohen Grad an Veränderung und Zerstörung bis hin zur Trockenlegung durch den Menschen. Die Eingriffe durch den Menschen erhöhen die Vulnerabilität der Süßwasserökosysteme gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels und schränken ihre Anpassungsfähigkeit ein (Capon et al., 2013; Reid et al., 2019; Capon et al., 2021). Mit der weiteren globalen Erwärmung, der zunehmenden Intensität und Dauer von Hitzewellen sowie der verringerten Durchmischung der Wassersäule durch die Ausbildung und Trennung von Wasserschichten auf Grund ihrer unterschiedlichen Temperatur (Kap. 2.2.1.2) wird sich auch die Sauerstoffarmut verschärfen; hinzu kommt der steigende Eintrag und die Anreicherung von CO₂ (Woolway et al., 2021; Polazzo et al., 2022; Parmesan et al., 2022: 200; Capon et al., 2021). Dies verschlechtert die Wasserqualität für Organismen und ihre Gemeinschaften weiter, bei gleichzeitig steigendem Sauerstoffbedarf (Capon et al., 2021; z. B. Flüsse im Mittelmeerraum; da Silva et al., 2023).

Der Klimawandel ändert auch die Wasserspiegel in Seen und die saisonalen Wassermengen von Flüssen (Kap. 3.1.1.3). Dies beeinflusst die Konnektivität, also die Vernetzung der Gewässer untereinander (Parmesan et al., 2022: 200), oder führt zu Veränderungen in Nährstoffgehalt und Wasserqualität mit entsprechenden Konsequenzen für z. B. das Nahrungsnetz (Caretta et al., 2022: 618). Gleichzeitig wird die (saisonale) Eisbedeckung von Seen und Flüssen abnehmen (Parmesan et al., 2022). Häufigere und intensivere Extremereignisse führen im Extremfall zum Verlust des gesamten Süßwasserökosystems. Gerade die negativen Auswirkungen von Dürren treten auch häufiger in unseren Breiten auf, wie z. B. in weiten Teilen Europas bereits in den Sommern 2018, 2019, 2020 und 2022 (Buras et al., 2020; Blauhut et al., 2022). Die zunehmende (saisonale) Variabilität sowie die extremen Schwankungen der Wasserverfügbarkeit in Verbindung mit zunehmenden physikalischen und chemischen Veränderungen sind mit drastischen Konsequenzen für alle Süßwasser- und terrestrischen Ökosysteme weltweit verbunden.

Die beschriebenen Stressoren führen zu fortgesetzten Veränderungen in der Artenzusammensetzung sowie zur Störung der Interaktionen zwischen Arten, z. B. Änderungen von Räuber-Beute- oder Dominanzbeziehungen, und es bilden sich neuartige biologische Gemeinschaften. Dies führt zu Veränderungen, oft Vereinfachungen ökologischer Prozesse und Funktionen unter Abnahme ihrer Resilienz (Pecl et al., 2017; Caretta et al., 2022; Parmesan et al., 2022; Seebacher et al., 2023). Gleichzeitig

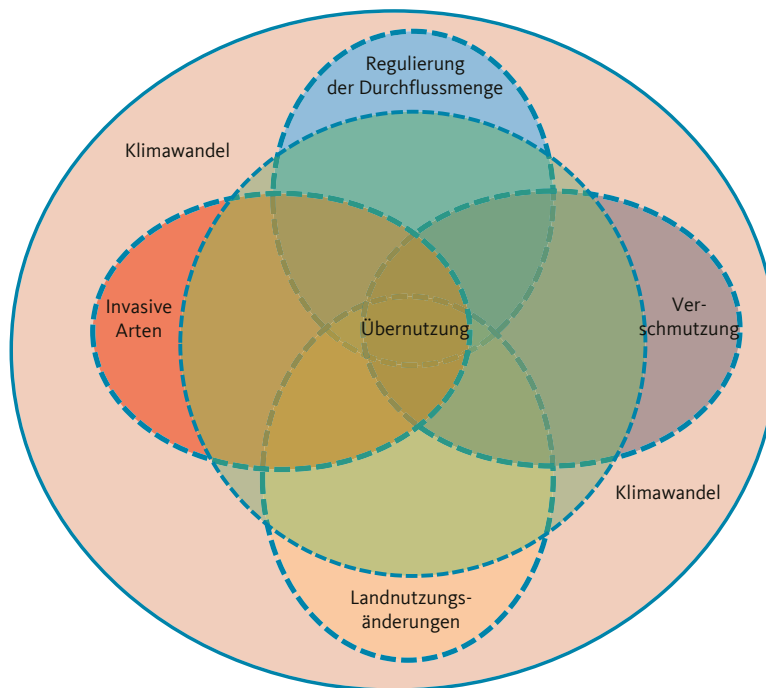


Abbildung 3.3-1

Konzeptionelle Darstellung von globalen Bedrohungen für Süßwasserökosysteme. Der gesamte planetare Aktionsraum entspricht der Ellipse des Klimawandels (rosa). Die einzelnen Süßwasserkörper können entsprechend der Kombination von Bedrohungskategorien, denen sie ausgesetzt sind, innerhalb dieses Aktionsraums positioniert werden. Die Übernutzung nimmt die Mitte des Raums ein, weil dies die früheste und manchmal einzige Bedrohung für die biologische Vielfalt von Süßwasser in abgelegenen oder dünn besiedelten Gebieten ist. Die meisten Süßgewässer befinden sich in Bereichen, in denen sich drei oder mehr Bedrohungskategorien überschneiden.

Quelle: Dudgeon, 2019

verschieben sich die Verbreitungsgebiete von Süßwasser-Arten durch die Temperaturänderungen zunehmend polwärts und in größere Höhen. Diese Veränderungen sind zwar kleinräumiger, aber von den Mechanismen her mit denen vergleichbar, die im Ozean (oder teils auch an Land) bereits beobachtet und für die Zukunft mit immer drastischeren Auswirkungen vorhergesagt werden (Pörtner et al., 2014). Auch führen Veränderungen der „Zeitgeber“ (d.h. äußere Einflüsse, die auf die innere Uhr eines Organismus wirken, z. B. Licht oder Temperatur) an Land und im Wasser, z. B. durch ein zeitlich verändertes Ansteigen der Umgebungstemperatur im Frühjahr, zu einem immer früheren Einsetzen der Frühjahrsblüte, des Laichens oder zu einer Verlängerung der Wachstumssaison (Parmesan et al., 2022: 200). An Land sind ähnliche Phänomene wirksam und bedeuten auch einen damit verbundenen früheren Wasserverbrauch durch die Vegetation (Parmesan et al., 2022: 225). In der Folge geht die zeitliche Übereinstimmung verschiedener ökologischer Prozesse verloren. Die Zeitfenster für Aktivitäten und Wachstum zwischen und innerhalb von Arten und Lebensstadien überlappen

nicht mehr, was zukünftig ihre bisherigen Interaktionen wie beispielsweise bei Nahrungsaufnahme, Konkurrenz oder Fortpflanzung beeinträchtigen wird. Diese Prozesse verändern und bedrohen nicht nur existierende Ökosysteme (Kap. 2.2.1), sondern schaffen auch neue, mit nicht absehbarer Zusammensetzung und unbekannten Eigenschaften. Beispielsweise entstehen durch das zunehmende Abschmelzen der Gletscher postglaziale Ökosysteme, deren zukünftige ökologische Bedingungen und Charakteristika regional variieren können und generell noch wenig erforscht sind (Bosson et al., 2023).

Spezialisten (insbesondere kälteabhängige Arten) und solche Arten, die allein auf Gletschern oder in gletschergeprägten Habitaten zu finden sind (Endemiten), verlieren Lebensraum (Bosson et al., 2023: 566). Einzelne Refugia bleiben möglicherweise bestehen (Wilkes et al., 2023), jedoch wird die Ausbreitung verschiedener postglazialer Ökosysteme „die Lebensräume, die ökologische Konnektivität und die Anpassungsfähigkeit von Generalisten-Arten lokal vergrößern“ und zu einer Homogenisierung von Lebensräumen führen (Bosson et al., 2023: 566).

Die saisonalen Veränderungen der Wassermengen von z. B. Flüssen, aber auch Dürren oder Überschwemmungen führen im Trend zu einer zunehmend eingeschränkten Wasserverfügbarkeit für Flora und Fauna. Landlebende Tiere sind in unterschiedlicher Weise an Schwankungen der Wasserversorgung angepasst. Unter den Säugern finden sich beispielsweise Organismen wie Kamele oder einige Nager, die extrem sparsam mit Wasser umgehen können und sogar mit dem Wassergewinn aus der Oxidation trockener Nahrung auskommen, dementsprechend werden sie auch künftig resilienter gegenüber Schwankungen in der Wasserverfügbarkeit sein. Andere und nicht zuletzt der Mensch (Kap. 2.1, 3.2.2), reagieren auf Wassermangel dagegen sehr rasch mit gesundheitlichen Problemen, vor allem bei gleichzeitiger Wärmebelastung. In Kombination mit Hitze werden zunehmende Wasserknappheit und Dürren verstärkt zu Massensterben wildlebender Tiere in terrestrischen und Süßwasserökosystemen sowie der marinen Küstenzone (Gezeitenzone, flache Lagunen und Felstümpel) führen. Darüber hinaus wird sich die Zusammensetzung der Vegetation verändern (Parmesan et al., 2022; WBGU, 2023).

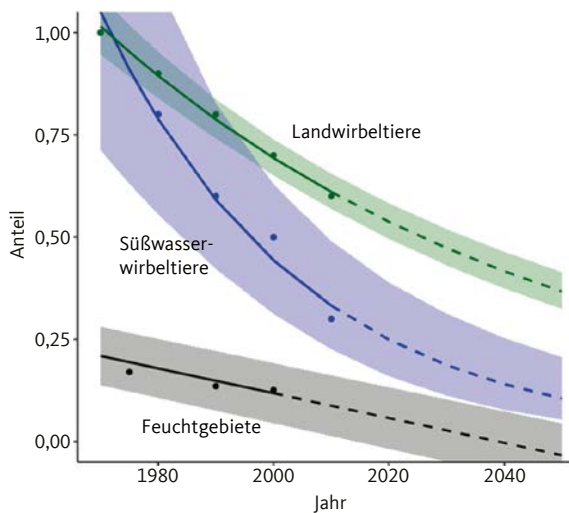
Beispielsweise steigt mit zunehmenden Temperaturen der Wasserbedarf der Vegetation und wird schließlich mit abnehmender Bodenfeuchte auch bei konstanten oder sogar zunehmenden Niederschlägen nicht mehr gedeckt. Resultat werden Vegetationsverschiebungen und -übergänge in Richtung Trockenwälder, Steppenbildung und schließlich Wüstenbildung sein, sofern die Pflanzen austrocknen oder die letale Hitzetoleranzgrenze überschritten wird und die Vegetation abstirbt. Aufgrund steigender Temperaturen, zunehmender Trockenheit und fallender Grundwasserstände wird sich auch der Anteil geschädigter einheimischer Bäume von Jahr zu Jahr erhöhen, die Produktivität der Vegetation sinken und Anpassungsgrenzen einiger Arten überschritten werden (Teskey et al., 2015; Hammond et al., 2022). Insbesondere in Monokulturen können sich dann Schädlinge wie der Borkenkäfer leichter ausbreiten. Der zunehmende Schädlingsbefall mit nachfolgendem Biozideinsatz in der Forstwirtschaft könnte zusätzlich der Wasserqualität schaden. Insbesondere das bodennahe Aufbringen von Schädlingsbekämpfungsmitteln auf im Wald gelagertes Schadholz (d. h. Bäume, die z. B. durch Stürme, Eis oder durch Schadinsekten geschädigt sind) kann zu Auswaschungen von den anliegenden Bodenoberflächen in Oberflächengewässer sowie in tiefere Bodenschichten mit möglichem Eintrag ins Grundwasser führen (Kahle und Nöh, 2009; Rivera-Dávila et al., 2021). Aufgrund der schlechten biologischen Abbaubarkeit und der störenden Wirkung auf den Hormonhaushalt (endokrine Disruptoren) kann dies mit negativen Auswirkungen für Insekten, Gewässerlebewesen und nicht zuletzt für den Menschen verbunden sein (Kap. 3.3.2; UBA, 2017; UBA

und BMU, 2017; Tang et al., 2021). Beispiele toxischer Substanzen sind Cypermethrin-Produkte, die in der EU erst seit 2021 nicht mehr zugelassen sind, sowie Lambda Cyhalothrin in der Forstwirtschaft. Beide Stoffe werden von der EU mittlerweile als umweltbelastende Biozide charakterisiert (Neue prioritäre bzw. prioritär gefährliche Stoffe der Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates).

Durch die zunehmende Trockenheit der Wälder aufgrund fehlender Niederschläge und Wassermangel nimmt auch die Gefahr für Wald- und Steppenbrände weltweit weiter zu (IPCC, 2021b). Auch zunehmende Überschwemmungen außerhalb des normalen Regimes (Kap. 3.1.1) sind für Produktivität und Gesundheit der Ökosysteme und ihrer Bewohner schädlich, befördern Krankheiten und den Tod wildlebender Tiere, nicht zuletzt durch Ertrinken, aber auch durch eine Zerstörung des Habitats (WBGU, 2023). Die zunehmende Versalzung des Süßwassers ist ebenfalls eine Bedrohung für Vegetation, Tierwelt bzw. ganze Süßwasserökosysteme (Grieger et al., 2020; Jeppesen et al., 2023). Nicht nur die Verfügbarkeit genießbaren Wassers wird künftig weiter sinken, sondern im brackigen Wasser auch die Biodiversität. Dies wird durch die Beobachtung bestätigt, dass Süßwasser- und Meeresökosysteme bei stabil unterschiedlicher Salinität eine höhere Biodiversität erreichen als Brackwasserökosysteme. Ebenso werden exzessive Niederschläge zu einer zunehmenden Aussüßung (Kap. 3.1.1) an Küsten oder in Lagunen führen und marine Organismen und Gemeinschaften belasten. Dies gilt auch und vor allem in den ausgedehnten Gezeitenzonen (Watten) der Flachmeere wie beispielsweise der Nordsee.

Auch die zunehmende Verschmutzung (Kap. 3.1.3) schränkt die organismische Leistungsfähigkeit weiter ein, wenn gesundheitsgefährdende Konzentrationen erreicht werden. Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Verschmutzung können auch die reinigenden Mikroorganismen des Grundwassers schädigen und damit die Wasserqualität weiter herabsetzen. Hierbei wirken Schadstoffe, zunehmende Wärmebelastung durch den Klimawandel sowie möglicherweise auch steigende geothermische Nutzung zusammen und gefährden die reinigenden Mikroorganismen (Blum et al., 2021). Insgesamt wird weltweit eine weitere Abnahme der Wasserqualität prognostiziert, und auch für Deutschland muss befürchtet werden, dass die Wasserqualität in Ökosystemen in Zukunft durch die eingebrachten Schadstoffe weiter unter Druck gerät (UBA, 2018b).

In Summe zeichnet sich vor allem für terrestrische und Süßwasserökosysteme ein Verlust von Lebensraum oder Lebensraumqualität ab, der nicht allein durch Temperaturextreme, sondern auch durch die Süßwasserverfügbarkeit bestimmt wird. Die Verfügbarkeit von Wasser ist grundlegend für Pflanzenwachstum – und damit für

**Abbildung 3.3-2**

Trends in der globalen Biodiversität ausgehend von einer Basislinie von 1970. Living Planet Index (Indikator für biologische Vielfalt) für Süßwasser-Wirbeltierpopulationen (blau), für terrestrische Wirbeltierpopulationen (grün) und globaler Feuchtgebietsverlust (grau). Das Modell des globalen Feuchtgebietsverlustes wurde an die Daten von 1700 bis 2000 angepasst und für die Kompatibilität mit den Living Planet Index-Datensätzen von 1970 bis 2050 aufgetragen. Historische Schätzungen als durchgezogene Kurven mit 95%igen Vorhersageintervallen. Daten als kumulative Proportionen der globalen Gesamtzahlen.

Quelle: Albert et al., 2021

das Funktionieren von Ökosystemen wie Wäldern oder Graslandschaften. Umgekehrt sind gesunde Ökosysteme wie Wälder wesentlich für eine lokal stabile Süßwasserverfügbarkeit. Wasser hat somit nicht nur eine Bedeutung für Biodiversität, sondern Biodiversität auch für Wasser. Allerdings wird die Biodiversität mit fortschreitender Erwärmung und veränderten Niederschlagsmustern auch in Zukunft weiter abnehmen, ausgenommen im Szenario mit den niedrigsten Treibhausgasemissionen (IPBES, 2019a: XLI; Caretta et al., 2022: 617).

Verstärkt wird dies in vielen aquatischen und terrestrischen Ökosystemen durch abnehmende Wasserqualität, etwa durch den Eintrag von Nährstoffen und dadurch zunehmende Eutrophierung und auch Deoxygenierung (IPBES, 2019a: 349, 61). In einem Szenario von Albert et al. (2021) werden die projizierten Veränderungen bis 2050 als Extrapolationen der Veränderungen seit 1970 gezeigt (Abb. 3.3-2). Solange keine Kipppunkte überschritten werden, setzt eine solche Entwicklung unverändertes Verhalten des Menschen („business as usual“; BAU) und sein Versagen voraus, transformativ tätig zu werden. Es wird deutlich, dass dies keine Option für eine nachhaltige Zukunft ist. Der projizierte, durch Verschärfungen erhöhte Verlust der Biodiversität sowie der damit einhergehende Verlust ökologischer Funktionen innerhalb von Süßwasser- und anderen Ökosystemen gefährdet zunehmend die Dienstleistungen der Natur, welche auch das Leben der Menschen auf Planet Erde unterstützen (Lynch et al., 2023).

3.3.2

Zunehmende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Auch die Lebensbedingungen des Menschen können sich so ungünstig verändern, dass Lebensunterhalt und Ernährung vor Ort nicht mehr gewährleistet sind. Dabei sind Veränderungen der Wasserqualität und -quantität und der damit verbundene Mangel an gesundheitlich unbedenklichem Wasser nur ein Teil der Bedrohungslage. Wasserknappheit, Verschmutzung und Überschwemmungen wirken sowohl direkt als auch indirekt auf den Menschen. Sie können den dauerhaften Verlust von Gesundheit, von Gesundheits- und Hygieneeinrichtungen und den Verlust sozialer Gefüge, aber auch einer hohen Anzahl an Menschenleben zur Folge haben. Durch unregelmäßige bzw. unzureichende Wasserversorgung wird nicht nur die Vitalität des Einzelnen und seine Leistungen in der Gesellschaft beeinträchtigt, sondern schließlich auch die Leistungsfähigkeit der Gesellschaft insgesamt, mit entsprechenden wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Konsequenzen. Dies betrifft nicht nur die Fähigkeit, sich auf wiederholte Schadenereignisse vorzubereiten und Risiken durch Anpassung zu begrenzen, sondern auch die Aufrechterhaltung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit bei zunehmend intensiveren Schadensereignissen (IPCC, 2022a, 2023b).

3.3.2.1

Trinkwasserverfügbarkeit und -qualität

Wie auch andere Organismen braucht der Mensch eine stabile Versorgung mit Wasser in ausreichender Menge und Qualität (Kap. 2.1). Steigende Umgebungstemperaturen erhöhen den täglichen Grundbedarf (Jequier und Constant, 2010), so dass die Versorgung mit ausreichend Trinkwasser existenzielle Voraussetzungen für erfolgreiche Hitzeschutzmaßnahmen in der Klimakrise sind. Hitzeschutzmaßnahmen dienen im Zuge der zunehmenden Hitzewellen der Gesundheitsprävention, insbesondere dem Schutz vulnerabler Gruppen wie Menschen mit Vorerkrankungen, älteren Menschen, Kindern und Schwangeren.

Durch Wasserknappheit könnten Trinkwasserbrunnen versiegen oder kontaminiert werden. Beispiele dafür gibt bereits heute, und sie werden in Zukunft häufiger werden. Verschärfungen sind besonders im Nahen Osten, Nordafrika, im Südlichen Afrika, an der Westküste Lateinamerikas und in Zentralasien und Indonesien zu beobachten. Aber auch Australien, Teile der USA sowie der Mittelmeerraum stehen vor großen Herausforderungen (IPCC, 2022a). Gerade in den Niedrigeinkommensländern könnte dies dazu führen, dass noch weitere Wege zur Trinkwasserbeschaffung zurückgelegt werden müssen. Diese Aufgabe wird bis heute fast ausschließlich von Frauen bewältigt. Unterschiede zwischen Arm und Reich und zwischen den Geschlechtern drohen sich zu verschärfen, mit drastischen körperlichen Gesundheitsfolgen für die benachteiligten Individuen (Romanello et al., 2023). Wasser wird nicht nur als Trinkwasser benötigt, sondern ist auch unersetzlich für Hygiene und Sanitär (WASH, Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen). Hier könnten Erfolge der Vereinten Nationen im Kampf für SDG 6 durch den fortschreitenden Klimawandel zunichte gemacht werden (UN, 2018). Neben Trockenheit und Dürren und der damit verbundenen Wasserknappheit steigern höhere Wassertemperaturen sowie häufigere Hochwasserereignisse den Druck auf den Weiterbestand und die Fortentwicklung sicherer WASH-Verhältnisse, insbesondere in Ländern mit nicht ausreichender Abwasserbehandlung (Mora et al., 2022; UN Water, 2023; Kap. 3.1.3).

Während Hochwasser Fäkalien und belastetes Erdreich in Oberflächengewässer und Trinkwasserversorgungssysteme spülen kann, führen Dürren und hohe Temperaturen zur Abnahme der Wassermengen sowie Aufkonzentrierung von Schadstoffen und Keimen und bilden einen bevorzugten Nährboden für Vektoren von Infektionskrankheiten und Parasiten. Die Zahl der damit verbundenen Erkrankungen könnte weltweit wieder zunehmen (Mora et al., 2022).

Darüber hinaus hängt auch die Qualität der medizinischen Versorgung maßgeblich von der Qualität

der Wasserversorgung ab (z. B. Patientenversorgung einschließlich intravenöser Flüssigkeiten oder Dialyse) bzw. beeinflusst diese durch ihre eigenen Umweltauswirkungen (z. B. gefährliche medizinische Abfälle und Chemikalien), d. h. sie kann selbst zur Verschärfung beitragen (Sugg et al., 2020; WBGU, 2023). Die Gefahren, die von medizinischen Abfällen wie Röntgendetektionsmittel, Antiepileptika, Blutdrucksenkern, Antibiotika und hormonellen Verhütungsmitteln ausgehen, werden im WBGU-Gutachten „Gesund leben auf einer gesunden Erde“ (WBGU, 2023: 199 ff.) ausführlich erläutert. Während u. a. dem zunehmenden Einsatz von pharmazeutischen Produkten in der EU mit der vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen entgegengesteuert wird (Kap. 7.1), könnte es in einigen Regionen weltweit zu einer zunehmenden Kontamination der Gewässer mit Rückständen und verstoffwechselten Spurenstoffen aus Kommunalabwässern, medizinischen Einrichtungen und der Produktion von Pharmazeutika kommen – mit erhöhter Expositionswahrscheinlichkeit und damit verbundenen gesundheitlichen Risiken für die Menschen der betroffenen Regionen bei unzureichender Abwasserbehandlung. Die zunehmende Verlagerung der Produktion in Niedrigeinkommensländer und die damit verbundene Gewässerverschmutzung aufgrund fehlender oder weniger strikter Umweltauflagen ist ein wachsendes Problem für die Gesundheit aquatischer Systeme sowie die menschliche Gesundheit vor Ort (Ranjan et al., 2022).

Ähnliches gilt für die Gabe wachstumsfördernder Hormone in der Nutztierhaltung, die in der EU verboten ist, aber in Ländern außerhalb der EU praktiziert wird. Bei wachsendem Fleischkonsum ist mit einer Zunahme von Hormonen in Gewässern und im Trinkwasser zu rechnen (Cheng et al., 2020; Yazdan et al., 2022). In den EU-Staaten, wie auch in anderen Ländern, ist die Verwendung von Hormonen in der Tierhaltung zwar reguliert, aber nicht komplett untersagt. Äußerst bedenklich ist die Entwicklung in der zielgesteuerten Tierreproduktion. So kommen vor allem in der Schweinemast immer häufiger Hormonpräparate zum Einsatz, die bei den Muttersauen eine Superoovulation (multiple Eisprünge) auslösen bzw. eine Massensynchronisation und Beschleunigung der Periodenzyklen bewirken sollen. Mit diesen Maßnahmen sollen der Produktionsertrag maximiert und die Kosten minimiert werden. Ein Beispiel ist das Hormon Pregnant Mare Serum Gonadotropin (PMSG), das aus trächtigen Pferdestuten gewonnen wird (Manteca Vilanova et al., 2019). Zum einen ist die Gewinnung für das Tierwohl äußerst bedenklich. Zum anderen können hohe Kosten auf die Gesellschaft zukommen, da noch kaum Untersuchungen zur Freisetzung in die Umwelt (inklusive Gewässer) und damit verbundene Auswirkungen durch den massenhaften Einsatz von PMSG vorliegen. Dies gilt auch für teurere, synthetische Alternativen. Auswirkungen auf

das Hormonsystem und die Entwicklung von Wasserorganismen sind aber nicht auszuschließen.

Eine weitere Gesundheitsbedrohung ist die unkontrollierte Freisetzung von Antibiotika in die Gewässer (Larsson und Flach, 2022). Im Wasser oder Wirten lebende Bakterien können Antibiotikaresistenzen entwickeln und bei Übertragung auf den Menschen nicht mehr oder nur noch sehr eingeschränkt mittels Reserveantibiotika bekämpft werden. Ein Grund dafür ist der übermäßige und unsachgemäße Einsatz von Antibiotika beim Menschen und in der Landwirtschaft (WBGU, 2023). Wie auch die WHO sieht der WBGU dies als eine der derzeit größten Bedrohungen für die globale öffentliche Gesundheit (WHO, 2022b).

3.3.2.2

Physische und psychische Gefahren zunehmender Extremereignisse

Fluten und Überschwemmungen haben unmittelbare Folgen für die Gesundheit der Menschen, sowohl physischer (Verletzungen, unter Umständen mit Todesfolge) als auch psychischer Natur (Angstzustände, Depressionen und posttraumatische Belastungsstörung), sowie durch den Verlust der medizinischen Versorgung (Personal und Infrastruktur) oder des Zugangs zur selbigen. Während laut Lancet Countdown Report 2023 die Gefahren durch Überschwemmungen in Hocheinkommensländern aufgrund infrastruktureller Hochwasserschutzmaßnahmen abgenommen haben, müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um die Verschärfung der Risiken durch Flutkatastrophen besser prognostizieren und einschätzen zu können (Romanello et al., 2023).

Überschwemmungen haben sowohl kurzfristige als auch langfristige gesundheitliche Folgen (WBGU, 2023). Gesundheitlich ist ein längerfristiger Aufenthalt im Wasser für den Menschen als landlebenden Organismus lebensgefährlich. Neben der Gefahr des Ertrinkens oder Verschüttens, ausgelöst durch Hochwasser bzw. Sturzfluten, besteht für den Menschen zunehmend die Gefahr von psychischem Stress durch Evakuierung oder Verlust des Wohngebäudes oder gar der Heimat. „Verletzungen und Wundinfektionen, entzündliche Reaktionen von Haut, Bindehäuten und Atemwegen, zusammen mit der Verschlimmerung bereits bestehender chronischer Krankheiten, sind die Hauptursachen für Morbidität bei den betroffenen Anwohner: innen und Hilfskräften unmittelbar nach Überschwemmungen“ (WBGU, 2023). Durch Überflutungen von Kläranlagen, landwirtschaftlichen Flächen, Industrieflächen oder kontaminiertem Erdreich können toxische Chemikalien freigesetzt werden. Auch können aus diesen Quellen Krankheitserreger in Oberflächenwasser oder Grundwasser gespült werden (WBGU, 2023). Die zunehmende Häufigkeit von Überflutungen wird daher in Zukunft Lebensqualität sowie

wirtschaftlichen Erfolg immer stärker einschränken. Bei einer zukünftigen globalen Temperaturerhöhung um 1,5 °C würden – in Abhängigkeit von der sozioökonomische Entwicklung – im Vergleich zum Referenzzeitraum (1976–2005) die menschlichen Verluste durch Überschwemmungen weltweit um 70–83 % und die direkten Überschwemmungsschäden um 160–240 % ansteigen (Dottori et al., 2018).

Der fortschreitende Klimawandel wird zu einer Ausweitung der Trockengebiete der Erde führen, in denen schon heute schätzungsweise 30 % der Weltbevölkerung leben (WBGU, 2023). Der Anteil der von (extremer) Dürre beeinflussten Landflächen pro Jahr ist von 18 % im Zeitraum 1951–1960 bereits auf aktuell 47 % angestiegen (Zeitraum 2013–2022) und wird dies weiter tun (Romanello et al., 2023). Die Anzahl und Dauer der Dürreperioden nahmen seit dem Jahr 2000 um knapp 29 % zu, die meisten dürrebedingten Todesfälle gab es dabei in Afrika (UN Water, 2023). Weitere Verschärfungen dieser Trends sind, wie bereits in Kap. 3.1.3 erläutert, prognostiziert. Von extremen Dürren betroffen sein werden insbesondere die Gebiete der Erde, die ohnehin schon unter Niederschlagsmangel leiden (Kap. 4.3; UNESCO, 2020). Dies macht auch eine ausgewogene Ernährung zunehmend schwierig und kann entsprechende Beeinträchtigungen des Gesundheitszustands haben. So bezifferte die WHO die Todesfälle im Jahr 2019 bei Kindern unter fünf Jahren aufgrund von Mangelernährung auf 74.000, ausnahmslos in Niedrigeinkommensländern (WHO, 2023). Bei diesen Kindern konnte der Bedarf des Körpers an Proteinen oder Energie nicht ausreichend gedeckt werden. Die Folgen sind Untergewicht, Unterentwicklung, Kleinwuchs und Durchfallerkrankungen (Diarrhoe). 2019 waren weltweit 148 Mio. Kinder unterentwickelt und 45 Mio. litten unter Unterernährung. Verschärfungen durch Klimawandel könnten den derzeitigen Trend global abnehmender Mangelernährungen umkehren, mit ungünstiger Perspektive.

Weitere gesundheitliche Gefahren für den Menschen resultieren aus der ungünstigen Veränderung natürlicher Prozesse. Steigende Temperaturen und Dürreperioden erhöhen die Verdunstung und verringern die Menge an grünem Wasser. Das zunehmende Waldsterben aufgrund mangelnder Resilienz gegenüber Hitze und Trockenheit, deren Ursache unter anderem in der fehlgeleiteten Forstwirtschaft der vergangenen Jahrzehnte begründet liegt, führt zum Verlust des Waldes als lebendem Wasserspeicher und erhöht damit auch die Gefahr von Waldbränden (Kap. 2.2.1, 3.1.1; Romanello et al., 2023).

Für den Menschen bedeuten Waldbrände Gefahren für Leib und Leben, sowohl durch direkte Todesopfer von Flächenbränden als auch durch die damit einhergehende Luftverschmutzung in allen Teilen der Erde. Rußpartikel und zum Teil hochkarzinogene Verbindungen

aus Bränden werden die Lebensqualität durch eine Verschlechterung der Luftqualität in den kommenden Jahren weiter herabsetzen. Erfolge in der Luftreinhaltung könnten zurückgeworfen werden. Atembarer Feinstaub (Particulate Matter, PM) verringert außerdem die Lebenserwartung um mehrere Monate bis zu mehreren Jahren durch Erkrankungen vor allem der Atemwege und des Herz-Kreislauf-Systems (Kirrane et al., 2019; Maximilian et al., 2023). Im Vergleich zum Zeitraum 1995–2014 wird die Anzahl der Tage, an denen Menschen im globalen Mittel einer (sehr) hohen Waldbrandgefahr ausgesetzt sind, voraussichtlich bis Mitte des Jahrhunderts um etwa neun zusätzliche Tage ansteigen, was einem Anstieg um 11 % entspricht (Romanello et al., 2023).

3.3.2.3

Zunehmende Ausbreitung von Infektionskrankheiten

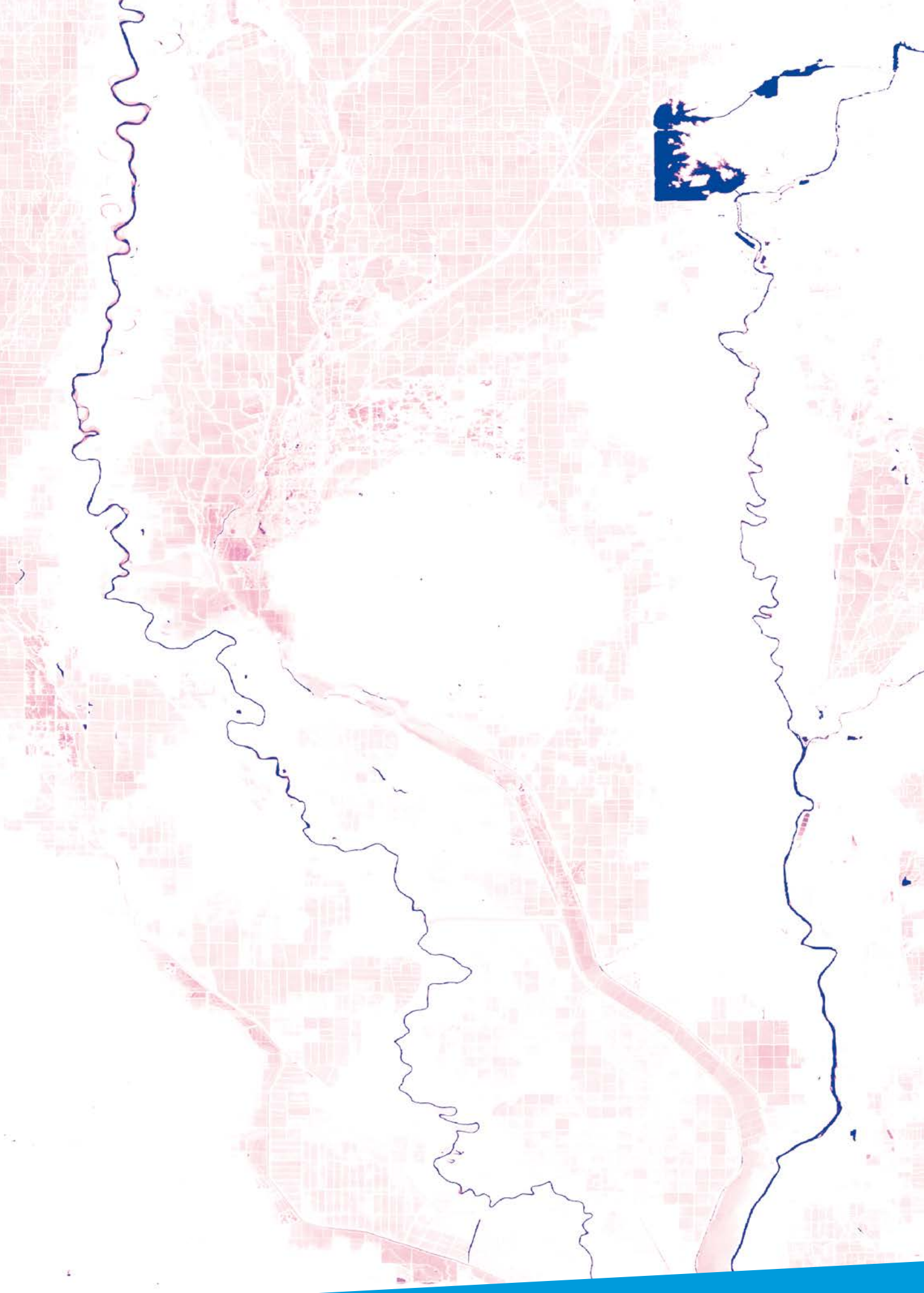
Die veränderten klimatischen Bedingungen sowie Wasserknappheit, Verschmutzungen und Extremereignisse wie zunehmende Überschwemmungen begünstigen die Ausbreitung von Infektionskrankheiten. Es kommt zur Zunahme von z. B. Magen-/Darm- und Atemwegserkrankungen oder auch Parasitenbefall (IPCC, 2022b) – mit Dynamiken, die die unkontrollierte Ausbreitung von Krankheiten begünstigen. Der globale Temperaturanstieg begünstigt die Ausbreitung vektorübertragener Infektionskrankheiten, da Vektoren wie die Aedesmücke sich immer weiter in bisher gemäßigte Klimazonen ausbreiten können. Gleichzeitig führen die häufiger werdenden Überschwemmungen zur Ausbreitung wasser- und vektorübertragener Krankheiten wie Cholera, Durchfallerkrankungen, Dengue, Hepatitis A und E, Leptospirose, parasitäre Erkrankungen, Rotavirus, Shigellose (bakterielle Ruhr) und Typhus. Der Lancet Countdown Report 2023 prognostiziert eine Zunahme des Übertragungspotenzials von Dengue um 36–37 % bis Mitte des Jahrhunderts. Bei einem 2 °C-Szenario der Erderwärmung wäre auf 23 % der Landflächen, auf denen sich Malaria bisher nicht ausbreiten kann, die Ausbreitung zukünftig möglich (Romanello et al., 2023).

geopolitische Entwicklungen sowie Gesundheitsschäden für Arten, Ökosysteme und Mensch. Durch sie könnten regionale Notlagen mit planetarer Dimension entstehen, die kaum noch durch den Menschen beherrschbar sind. Jede dieser Verschärfungen wirkt nicht allein, sondern kann in Kombination mit anderen weit drastischere Effekte erzeugen. Diese „compound impacts“ belegen die Dringlichkeit der Transformation zur Nachhaltigkeit (durch Änderung fundamentaler Systemeigenschaften) in Gesellschaft, Industrie, Transport, Energie, Infrastruktur, Land- und Raumnutzung sowie im Umgang mit natürlichen Ökosystemen, um nachteilige Entwicklungen zu vermeiden und die Resilienz betroffener Systeme zu stärken. Das folgende Kapitel 4 illustriert anhand von fünf Beispielsräumen (urbane Agglomerationen, MENA-Region, Hindu-Kush, Subsahara-Afrika, Central Valley), wo, warum und wie regionale Wassernotlagen jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums aufgetreten sind. Die erörterten Notlagen sind solche, die nicht regional begrenzt bleiben, sondern weltweit als sich wiederholende Muster auftreten, also eine globale Dimension entfalten werden.

3.4

Von globalen Verschärfungen zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension

Die in Kapitel 2 aufgezeigten Herausforderungen für einen Umgang mit Wasser in vom Menschen beeinflussten Systemen erfordern schon jetzt enorme Anstrengungen für ihre Bewältigung. In Kapitel 3 wurden die sich abzeichnenden globalen Verschärfungen und ihre Einflussfaktoren aufgezeigt: Hierbei handelt es sich um Klimawandel und Verschmutzung, sozioökonomische und



Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

4

In besonders gefährdeten Regionen können extreme Wassernotlagen jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums entstehen. Diese Krisen destabilisieren Gesellschaften und Ökosysteme. Beispiele hierfür sind Wasserknappheit in Städten, Dürren und Sturzfluten in der MENA-Region, Gletscherschmelze im Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirge, Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika oder Grundwasserübernutzung im Central Valley. Diese Wassernotlagen können Gesellschaften regional überfordern und bergen auch globale Risiken. Ähnliche Muster treten in vielen anderen Teilen der Welt auf.

Die in Kapitel 3 dargestellten wasserbezogenen Verschärfungen können zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension führen.

4.1 Die neue Qualität regionaler Wassernotlagen

Weltweit sind in den letzten Jahren in vielen Regionen Veränderungen des natürlichen Wasserdargebots sowie der Wasserverfügbarkeit aufgetreten, die sich außerhalb bisheriger Variabilität bewegen. Dies betrifft das Ausmaß der Veränderungen (regional bis planetar), die Häufigkeit und Dauer von Dürren, die Verknappung von Wasserressourcen, aber auch das häufigere Auftreten von Extremniederschlägen und Überflutungen (IPCC, 2022b; Reichhuber et al., 2022; UNESCO, 2023). Der WBGU bezeichnet die Folgen des Klimawandels für den Wasserkreislauf, das Wasserdargebot und die Wasserqualität sowie den steigenden menschlichen Nutzungsdruck auf Wasserressourcen (wie etwa ein steigender Pro-Kopf-Wasserverbrauch) als Verschärfungen wasserbezogener Probleme (Kap. 3). Auch geopolitische Verwerfungen können einen nachhaltigen Umgang mit Wasser und Kooperation in der grenzüberschreitenden Wassernutzung erschweren (Kloke-Lesch und Hornidge, 2023).

4.1.1 Veränderungen jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums

Verschärfungen wasserbezogener Probleme können sich abhängig von regionalen Bedingungen zu regionalen Wassernotlagen zuspitzen, deren Ausmaß jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums liegt. Diese Wassernotlagen ergeben sich aus einer gegenseitigen Verstärkung der skizzierten Verschärfungen wasserbezogener Probleme. Es handelt sich also in der Regel nicht um Phänomene mit einer Ursache, sondern um komplexe Wirkungskaskaden oder „kombinierte Risiken“, u. a. verbunden mit erheblichen gesundheitlichen Risiken oder Todesfällen (IPCC, 2022b). Der WBGU definiert regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension als Krisen, die aus dem Zusammenspiel wasserbezogener Verschärfungen (Kap. 3) entstehen. Wassernotlagen lassen sich als wiederkehrende, typische Muster weltweit beobachten und sind gekennzeichnet durch eine hohe Zahl betroffener Menschen bzw. können große Naturräume und deren Biodiversität beeinträchtigen. Das Ausmaß und die Dynamik dieser Wassernotlagen können bisher beherrschbare Risiken überschreiten. Die zunehmenden Veränderungen des natürlichen Wasserkreislaufs, von der Gletscherschmelze im Himalaya (Kap. 4.4) bis hin zur Übernutzung des Grundwassers in den USA (Kap. 4.6), können sich zu Auslösern regionaler Krisenherde mit

eigenen Dynamiken entwickeln. Regionale Wassernotlagen können bestehende Probleme verstärken, z. B. in der Wasser-, Sanitär- und Hygieneversorgung (WASH), und zu weiterer gesellschaftlicher Polarisierung beitragen. Sie bewirken direkt oder zeitlich versetzt humanitäre Notlagen. Diese sind gekennzeichnet durch einen signifikanten Verlust der Lebensqualität, den Verlust des Lebensraums und der gesundheitlichen Unversehrtheit – bis hin zum vorzeitigen Tod. Wassernotlagen können weitreichende, auch transregionale Folgen nach sich ziehen und die Menschheit in zunehmend unsichere Handlungsbereiche und zu abnehmender Handlungsfähigkeit führen. Regionale Wassernotlagen können in ihren Dynamiken und Wechselwirkungen mit wasserbezogenen Verschärfungen eine planetare Notlage verursachen (z. B. Ernährungskrise).

4.1.2 Exemplarische Auswahl regionaler Wassernotlagen: Überblick

In diesem Kapitel werden Beispiele für regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension vorgestellt, die als weltweit auftretende Muster (Tab. 4.1-1) mittel- und langfristig zu einer globalen Herausforderung werden können. Sie sind bisher noch kaum ins öffentliche Bewusstsein gelangt und weisen Risiken mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und hohem Schadensausmaß auf. Sie sollten daher dringend eine verstärkte politische Aufmerksamkeit erhalten. Im Folgenden werden fünf regionale Wassernotlagen beleuchtet, die sich in ähnlicher Weise in vielen Weltregionen wiederholen können bzw. bereits stattfinden (Abb. 4.1-1):

- › Wassermangel in Städten mit den Beispielen Chennai, Indien, und São Paulo, Brasilien (Kap. 4.2),
- › die Zunahme von Dürren und Sturzfluten in der Region Mittlerer Osten Nordafrika (MENA; Kap. 4.3),
- › Gletscherschmelze in der Gebirgskette Hindukusch-Karakorum-Himalaya mit Risiken für die großen Flussbecken (Kap. 4.4),
- › die vielerorts zunehmende Wasserverschmutzung, gezeigt am Beispiel von Subsahara-Afrika (Kap. 4.5),
- › die weltweit zu beobachtende Erschöpfung des Grundwassers durch Übernutzung und Klimawandel, gezeigt am Beispiel des Central Valley im US-Bundesstaat Kalifornien (Kap. 4.6).

In den angeführten Beispielen werden u. a. Möglichkeiten zum Umgang mit diesen Notlagen skizziert, gleichzeitig aber auch Anpassungsgrenzen, gesundheitliche Risiken und mögliche Grenzen der Beherrschbarkeit thematisiert (Kap. 5; Abb. 5.1-1). Diese (regionalen) Grenzen wurden z. B. während der Wasserkrise von Kapstadt in den Jahren 2015–2018 beinahe überschritten (Schleifer und

Otto, 2019): Diese Wasserkrise brachte Kapstadt mit seinen rund 4,6 Mio. Menschen an den Rand des Day Zero, des Tages, an dem die Metropole kein Wasser mehr haben würde (Hill-Lewis, 2023). Die lokale Wassernotlage (water emergency) konnte gerade noch abgewendet werden (Schleifer und Otto, 2019; Hill-Lewis, 2023; Simpson et al., 2023). Die Wasserkrise von Kapstadt war Folge von Missmanagement und Dürre: Die Wahrscheinlichkeit geringerer Niederschläge bzw. von Dürren im südlichen Afrika ist durch den Klimawandel um das fünf- bis sechsfache gestiegen (Pascale et al., 2020). Im Juni 2023 wurde auch in Montevideo (Uruguay) der Wassernotstand ausgerufen. Neben Städten können auch größere Regionen betroffen sein: Die Landesregierung von Katalonien (Spanien) hat wegen Wasserknappheit von Februar bis Anfang Mai 2024 den Wassernotstand ausgerufen und den Wasserverbrauch beschränkt.

Ein weiteres Beispiel ist das Abschmelzen der Gletscher in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirgskette. In dieser Region ist je nach Klimaszenario bis Ende des Jahrhunderts mit einer Abnahme des Gletschervolumens um 20–65 % zu rechnen (Yao et al., 2022). Die Gletscher sind wesentliche Quellen für einige Flussbecken in der Großregion, z. B. dem oberen Indus-Becken, wo Gletscherschmelzwasser 40 % des Gesamtabflusses ausmacht (Lutz et al., 2014). Die Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region ist eine Kornkammer von globaler Bedeutung: 61 % der Reisproduktion, 35 % der Weizenproduktion und 24 % der Maisproduktion stammen aus der Region (Hu und Tan, 2018; Kap. 4.4.2.1). In den Tieflandebenen der Region, z. B. dem Tiefland des Indus-Beckens, wird überwiegend Bewässerungsfeldbau betrieben (Scott et al., 2019).

Grundlegende Veränderungen der Wasserregime werden durch unzureichende Anstrengungen im Klimaschutz immer wahrscheinlicher. Umso wichtiger wird frühzeitiges Handeln auch bei der Anpassung, selbst wenn das Krisenszenario noch Jahrzehnte entfernt ist. Andernfalls droht eine zunehmende gesellschaftliche Destabilisierung mit wachsendem Konfliktpotenzial um knapper werdende Wasserressourcen und entsprechenden sicherheitspolitischen Folgen.

Die Abschwächung eines fortschreitenden Klimawandels und Biodiversitätsverlusts sowie kritischer Veränderungen des Wasserdargebots, der Wasserqualität und -verfügbarkeit müssen daher an erster Stelle stehen, um die Handlungsfähigkeit menschlicher Gesellschaften zu erhalten. Bleiben die Anstrengungen unter dem erforderlichen Niveau, verlässt die Menschheit den sicheren Handlungsraum: Durch die zunehmende Verengung des Handlungsspielraums im Umgang mit klimawandelbedingten Widrigkeiten bzw. nicht tolerablen Entwicklungen werden ab einem gewissen Zeitpunkt Anpassungsgrenzen (abhängig von der Resilienz) und damit Grenzen

der Beherrschbarkeit erreicht (Kap. 5). Im Extremfall tritt Handlungsunfähigkeit ein, mit negativen Folgen für das Wohlergehen und die Gesundheit von Mensch und Natur. Der Übergang von der Beherrschbarkeit zur Nichtbeherrschbarkeit ist abhängig von den jeweiligen generellen Anpassungskapazitäten sowie den Fähigkeiten

und der Bereitschaft von Gesellschaften, Resilienz aufzubauen oder wiederherzustellen, etwa durch den Einsatz von Kapital, Technologien, Änderung der Lebensweisen und der Bereitschaft, entsprechende Anstrengungen zu unternehmen.

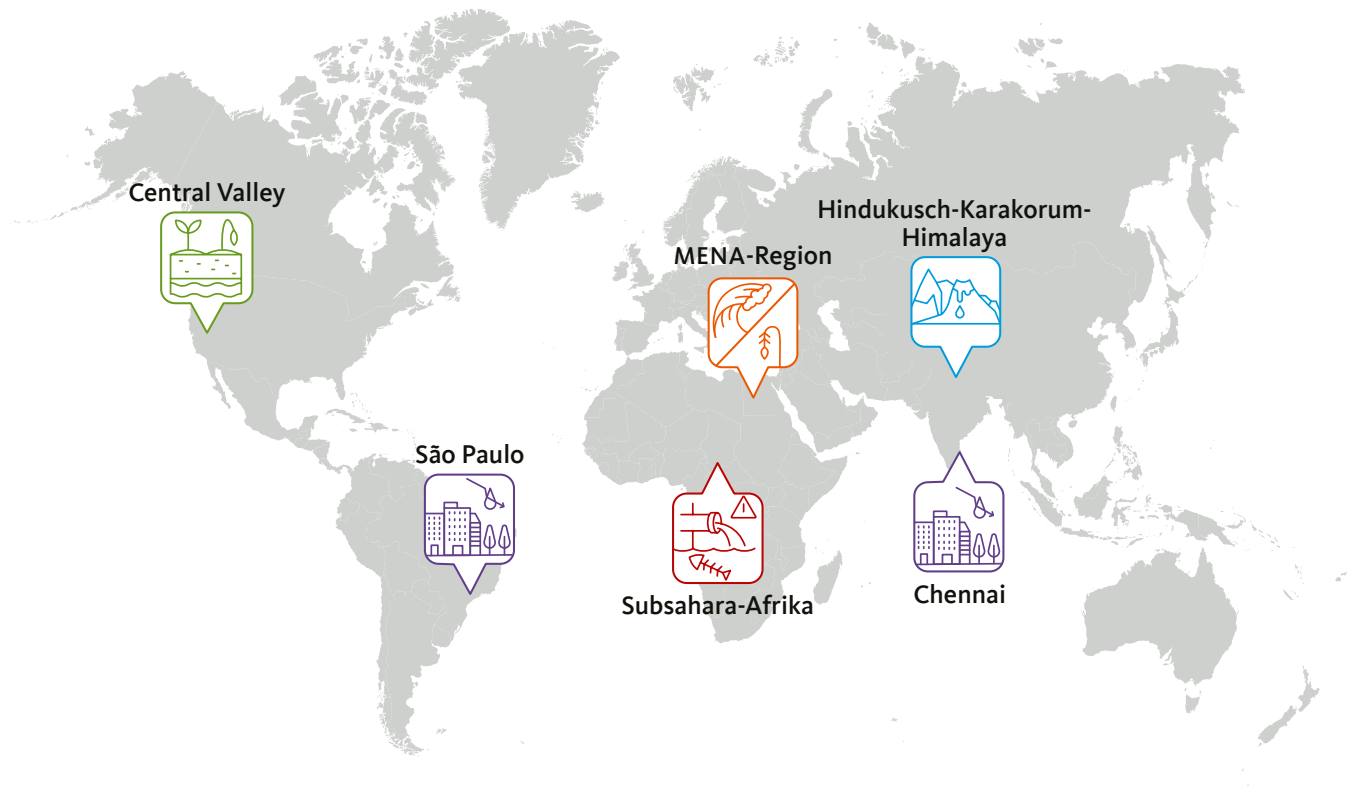


Abbildung 4.1-1

Geographische Lage der behandelten regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension. Icons markieren die in diesem Kapitel betrachteten Städte bzw. Regionen: Das Central Valley in den USA, São Paulo in Brasilien, Sub Sahara-Afrika, die Region Mittlerer Osten und Nordafrika (MENA), die Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region und Chennai in Indien.

Quelle: WBGU

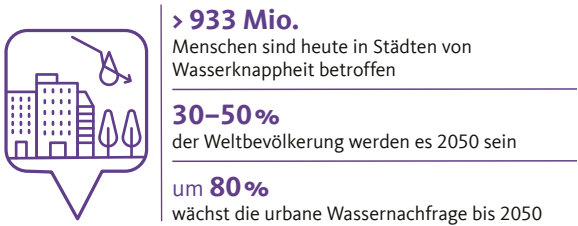
Tabelle 4.1-1

Auswahl weltweit auftretender regionaler Wassernotlagen. In der Tabelle werden exemplarisch weitere Regionen und Städte benannt, die von den fünf dargestellten Krisenmustern betroffen sind.

Quellen: He et al., 2021; Hugonnet et al., 2021; Hock et al., 2019; UNCCD, 2023; Chaplin-Kramer et al., 2019; Jones et al., 2023; Wen et al., 2017; Scanlon et al., 2023

Krisenmuster	Beispiele betroffener Regionen und Städte
Wasserknappheit in Städten	Ganzjährig betroffene Megastädte (2016): › Bangalore, Jakarta, Lahore, Lima, Mexiko-Stadt, Moskau, Neu-Delhi, Peking, Los Angeles
Dürren und Sturzfluten	2022–2023 wurde in 22 Ländern weltweit der Dürrenotstand ausgerufen: › Süd- und Nordamerika: Kanada, Uruguay, USA › Europa: Deutschland, Griechenland, Großbritannien, Italien, Portugal, Rumänien, Serbien, Spanien › Afrika: Dschibuti, Mauretanien, Niger › Asien: China, Indien, Indonesien, Kasachstan, Sri Lanka, › Ozeanien: Kiribati, Marshallinseln, Tuvalu
Gletscherschmelze und Verlust von Wasserspeichern	› Alaska › Alpen › Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirgskette › Südliche Anden › Westkanada und westliche USA
Wasserverschmutzung	› Nordindien › Ostchina › Subsahara-Afrika › Zentral- und Nordwestmexiko
Übernutzung des Grundwassers	› Arabische Halbinsel, Iran (Naher Osten) › Central Valley (USA) › Central und Southern High Plains (USA) › Don- und Dnepr-Becken (Osteuropa) › Ganges-Brahmaputra Aquifer (Indien) › Hai He-Becken und Aquifer der Nordchinesischen Ebene (China) › São Francisco-Becken (Südamerika)

4.2 Wasserknappheit in Städten und urbanen Agglomerationen



In den letzten 20 Jahren waren weltweit über 80 Metropolen bzw. Metropolregionen von schwerem Wassermangel betroffen (Rusca et al., 2023). Die Zahl der Berichte über Städte, denen das Wasser auszugehen droht,

steigt (Cremades et al., 2021; He et al., 2021; Rusca et al., 2023). Im Juni 2023 hat Montevideo den Wassernotstand ausgerufen, im Februar 2024 Barcelona und die Region Katalonien. Bereits heute sind viele Städte damit überfordert, sich der Geschwindigkeit und Dynamik des urbanen Wachstums infrastrukturell anzupassen, insbesondere in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens. Diese Problemkonstellation findet sich auch global wieder. Auch werden bei häufiger auftretenden bzw. intensiveren Wetterextremen Fehlentwicklungen im Städtebau verstärkt spürbar, insbesondere der Mangel an unversiegelten Flächen und Grünräumen, die den urbanen Wasserhaushalt (mit) regulieren können. Das folgende Kapitel zeigt die Dimension dieses weltweit wiederholt auftretenden Musters urbaner Wasserknappheit, illustriert an zwei Beispielen (Kasten 4.2-1, 4.2-2), und skizziert die damit verbundenen Herausforderungen.

4.2.1

Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen

Das Wachstum der Städte und ihrer Einwohnerzahl sowie der steigende Nutzungsdruck auf Wasserressourcen, verstärkt durch den Einfluss des Klimawandels, sind die treibenden Kofaktoren der zunehmenden Wasserknappheit in urbanen Agglomerationen weltweit.

4.2.1.1

Wirkungsmuster

Im Jahr 2016 haben über 30% der urbanen Bevölkerung in Gebieten mit Wasserknappheit gelebt (He et al., 2021). Mangel an Oberflächenwasser, Bodenversiegelung, Grundwasserübernutzung (Entnahme höher als Regeneration) sowie Anstieg des Wasserbedarfs durch Verstädterung und steigenden Pro-Kopf-Wasserbedarf sind die Haupttreiber für urbanen Wassermangel (He et al., 2021; Flörke et al., 2018; McDonald et al., 2014). Leckagen in der Wasserinfrastruktur verstärken die Wasserknappheit. Durch die rasche Urbanisierung werden bis Mitte des Jahrhunderts zwei Drittel der Menschheit, d. h. 6,6 Mrd. Menschen, in Städten leben, was einen Anstieg um 2,5 Mrd. Menschen bedeutet und den Nutzungsdruck auf urbane Wasserressourcen erhöhen wird (UN, 2019; WBGU, 2016). 90 % dieses Wachstums wird in Asien und Afrika stattfinden, wobei das stärkste Wachstum in Städten mit einer Bevölkerungszahl von bis zu 1 Mio. Menschen erwartet wird (IPCC, 2022c: 65 f.). Berechnungen zufolge wird erwartet, dass die städtische Süßwassernachfrage bis 2050 um bis zu 80 % ansteigen wird (He et al., 2021). Urbane Regionen in Asien und Afrika gelten aufgrund des prognostizierten Klimawandels (Kap. 3) kombiniert mit ungeplanter rascher Urbanisierung als Hochrisikostandorte (IPCC, 2022c). Der Anteil des Klimawandels an der weltweit zunehmenden urbanen Wasserknappheit wird bei ungebremster globaler Erwärmung künftig deutlich ansteigen (IPCC, 2022b). Die Nutzungskonkurrenz zwischen dem Wasserbedarf der wachsenden Städte und der Landwirtschaft der umgebenden Region sowie der Einfluss des Klimawandels verschärfen die Lage (Kasten 4.2-2).

4.2.1.2

Heutiges Ausmaß und Projektionen

Die Zahl der in Städten lebenden Menschen, die mit Wasserknappheit konfrontiert sind, wird von 933 Mio. Menschen, d. h. einem Drittel der globalen Stadtbevölkerung, im Jahr 2016 auf 1,6–2,4 Mrd. Menschen, d. h. ein Drittel bis fast die Hälfte, im Jahr 2050 ansteigen (Abb. 4.2-1; He et al., 2021; UNESCO, 2023). Die Zahl der von Wasserknappheit betroffenen Großstädte wird je nach Szenario von 193 auf bis zu 284 ansteigen, darunter 10–20 Megastädte (Kasten 4.2-1). Immer mehr Städte werden

von importierten Wasserquellen, von Transfers zwischen Wassereinzugsgebieten und von Süßwasser aus Entsalzungsanlagen abhängig sein (Sahu und Debsarma, 2023).

Nach den Daten der Vereinten Nationen leben 42 % der städtischen Bevölkerung der Welt in Städten bzw. urbanen Agglomerationen mit einer Gesamtbevölkerung von weniger als 300.000 Menschen (als Mittelstädte werden in der UN Städte mit einer Bevölkerungszahl von 1–5 Mio. bezeichnet; WBGU, 2016: 45). Da die künftige globale Urbanisierungsdynamik vor allem Klein- und Mittelstädte betrifft, greift es zu kurz, die globale urbane Wasserknappheit nur durch die Bewertung der Exposition von Großstädten zu erfassen. Untersuchungen zu globaler urbaner Wasserknappheit konzentrieren sich allerdings häufig auf Großstädte. Berechnungen zur Stadtbevölkerung, die von Wasserknappheit betroffen ist und alle Stadtgrößenklassen und nicht nur Großstädte berücksichtigt (He et al., 2021; Abb. 4.2-1), liegen entsprechend über den Berechnungen anderer Studien. Während He et al. (2021) zu dem Ergebnis kommen, dass die Zahl der von Wasserknappheit betroffenen Menschen von 933 Mio. im Jahr 2016 auf 1,7–2,3 Mrd. im Jahr 2050 ansteigen wird, liegen die Zahlen älterer Studien für das Jahr 2000 bei 150–810 Mio., für 2010 bei 320–650 Mio. und für 2050 bei 0,5–1,4 Mrd. (Flörke et al., 2018; McDonald et al., 2014).

Bei einer Untersuchung der Wassersituation der 482 größten Städte der Erde (736 Mio. Menschen oder 26 % der Weltbevölkerung) zeigte sich bei 27 % der untersuchten Städte, also 233 Mio. Menschen, ein künftiger Wasserbedarf, der das Volumen des verfügbaren Oberflächenwassers übersteigt. Dies bedeutet ein erhebliches Risiko für die urbane Wassersicherheit, weil rund 80 % der Städte der Welt ihren Wasserbedarf überwiegend aus Oberflächenwasser decken (Flörke et al., 2018). Eine steigende urbane Wassernachfrage erhöht auch den Nutzungsdruck auf die Grundwasserressourcen. In 238 der untersuchten Städte überstieg die Grundwasserentnahme die Wiederanreicherung, mit steigendem Trend bis 2050. 61 Städte waren vollständig von Grundwasser-nutzung abhängig.

Eine Studie von McDonald et al. (2014) betrachtet städtische Ballungsräume mit mehr als 750.000 Menschen, global sind dies 150 Stadtregionen mit insgesamt 1,5 Mrd. Menschen. Die Studie zeigt, dass trotz der Nutzung von Wasserkanälen oder dem Transport von Wasser mit Lastwagen und Zügen ein Viertel der untersuchten Städte von Wassermangel betroffen war, weil die bisherigen technischen Maßnahmen den Wassermangel nicht gänzlich ausgleichen konnten (McDonald et al., 2014). Die Studie berücksichtigt explizit auch die Möglichkeiten urbaner Wasserinfrastrukturen beim Umgang mit Wasserstress (Kasten 4.2-1).

4 Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

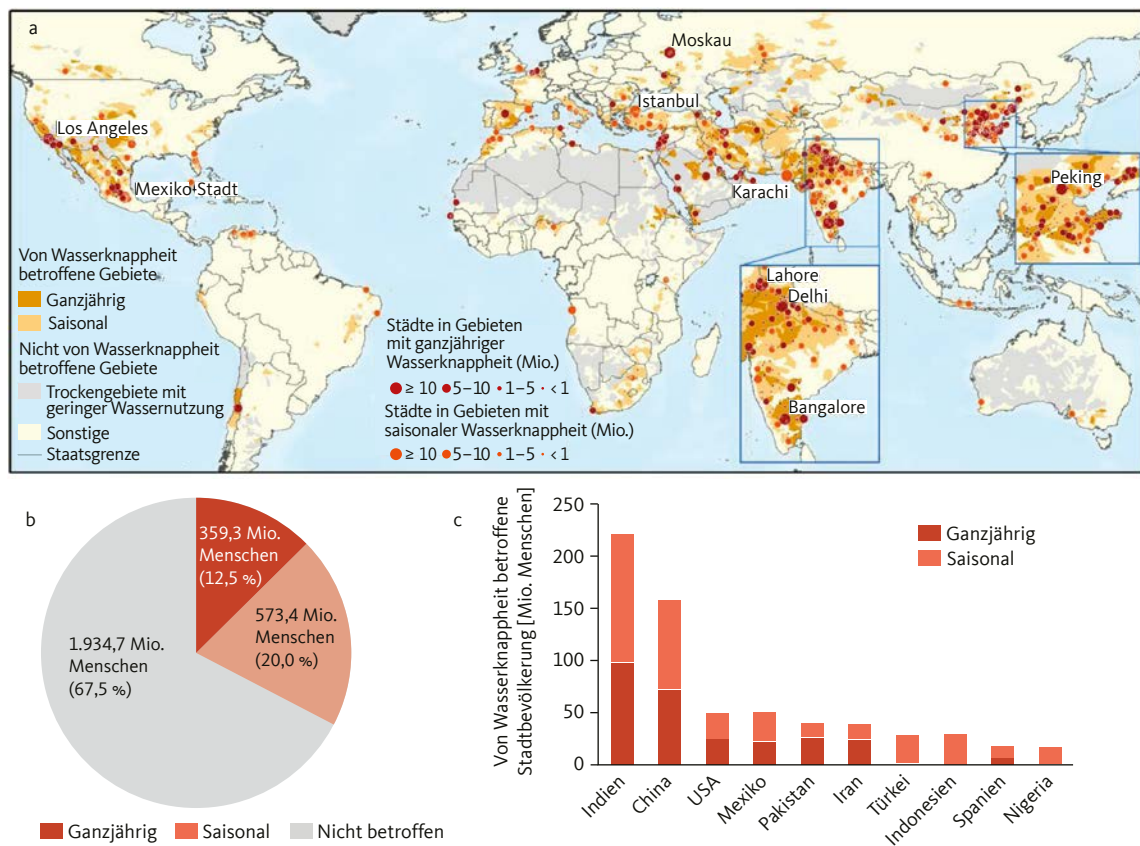


Abbildung 4.2-1

Globale Übersicht zur Wasserknappheit in Städten. Gezeigt werden für das Jahr 2016 nach Stadtgrößenklasse, Bevölkerungszahl und geographischer Lage die Städte, die weltweit von Wasserknappheit betroffen sind. Städte in Indien und China sind im globalen Vergleich am stärksten von saisonaler und ganzjähriger Wasserknappheit betroffen. Unter saisonaler Wasserknappheit leiden rund 20 % der in Städten lebenden Weltbevölkerung, während etwa 12 % ganzjährig diesem Problem ausgesetzt sind. Quelle: He et al., 2021

4.2.2 Ungleiche Lebensbedingungen und Wasser(un)sicherheit

Wie sich Wasserknappheit auf die Stadtbevölkerung auswirkt, wird wesentlich durch die unterschiedlichen Lebensbedingungen und Vulnerabilitäten geprägt. Dies gilt insbesondere für Länder niedrigen und mittleren Einkommens, wo ein beträchtlicher Teil der Stadtbevölkerung in informellen Siedlungen lebt. Informelle Siedlungen und Stadtquartiere sind besonders von unsicherer Wasserversorgung und fehlender Abwasserentsorgung betroffen, und die dort lebende Bevölkerung ist im Krisenfall häufig existenziell und gesundheitlich gefährdet (Simpson et al., 2023). Rund 1 Mrd. Menschen, die derzeit in informellen Siedlungen leben, gelten als besonders vulnerabel. Die

Tendenz ist steigend (UN-Habitat, 2022). Die Sicherung der urbanen Wasserversorgung für die gesamte Stadtbevölkerung ist eine der großen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte.

Die Planungsbehörden zögern oftmals besonders dann, wenn es darum geht, Infrastrukturen in informellen Siedlungen aufzubauen, um nicht nachträglich eine „Legalisierung“ zu schaffen. Während sich urbane Eliten in Städten mit Wassermangel oft einen hohen Wasserkonsum leisten, z. B. indem sie eigene Brunnen bohren, Grünanlagen unterhalten, Schwimmbecken besitzen und sich das Wasser durch Tankwagen anliefern lassen, haben Armutsgruppen Schwierigkeiten, ihre Grundversorgung mit sauberem Trink- und Sanitärwasser zu sichern (Rusca et al., 2023). Daher bilden Durchschnittswerte zur Wassersituation in Städten oft nicht das ganze Bild ab. Eine

Kasten 4.2-1**Wasserkrise in São Paulo, Brasilien,
2014–2016: Umsetzungsdefizite der urbanen
Wassergesetzgebung**

Zwischen 2012 und 2016 erlebte Brasilien eine der schwersten Dürren seiner Geschichte, die 2014–2016 in einer gravierenden Wasserkrise der wachsenden Metropolregion von São Paulo mündete. Dort leben rund 20 Mio. Menschen, davon etwa ein Drittel in Favelas (informellen Siedlungen) oder unter Slum-ähnlichen Bedingungen (Daniels, 2021). Anfang 2015 sank der Wasserstand des Cantareira-Systems (Verbund von Reservoirs zur Wasserversorgung der Stadt) auf rund 5 % des Gesamtvolumens (Slater, 2019) und löste damit die schwerste Wasserkrise seit 80 Jahren aus (Ozment und Feltran-Barbieri, 2018). Im März 2016 verbesserte sich die Situation nach ausreichend Regenfällen wieder. Zur Dürrekrise in São Paulo von 2014–2016 trugen insbesondere Management- und Planungsversagen, Korruption, Mängel in der Wartung von Wasserversorgungsinfrastrukturen sowie die Auswirkungen des Klimawandels bei (Slater, 2019).

Management- und Planungsversagen: São Paulo verfügt zwar über eine Wassergesetzgebung, diese wird jedoch häufig ignoriert bzw. nur fragmentarisch umgesetzt (Slater, 2019). In Brasilien ist die Finanzierung von Infrastrukturprojekten außerdem langwierig und anfällig für Korruption (Slater, 2019). Zudem haben die Behörden ihre Wasserpolitik an Szenarien ausgerichtet, die auf Niederschlägen im langjährigen Mittel basierten, obwohl die Effekte des Klimawandels auf die Änderung des Wasserdargebots bereits wissenschaftlich belegt waren (Soriano et al., 2016). Politikversagen spielte auch indirekt eine Rolle: Im September 2012, als die Dürre bereits ihren Lauf nahm, senkte die brasilianische Regierung die Strompreise um 20 % („die Bevölkerung kann soviel Strom verbrauchen wie sie möchte, weil er günstig ist und reichlich vorhanden“, Slater, 2019: 11), was zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führte. Da etwa die Hälfte des Stroms in Brasilien durch Wasserkraft erzeugt wird, stieg der Druck auf die Wasserressourcen durch das erforderliche erhöhte Speichervolumen der Staudämme der Wasserkraftwerke des Landes zusätzlich.

Zunehmende Wetterextreme: Die Häufigkeit von Dürren im Südosten Brasiliens stieg in den letzten Jahren signifikant an (Fearnside, 2021). In der ersten Jahreshälfte 2018 kam es erneut zu einer extremen Dürre, was die Winterwasserstände der Reservoirs im Bundesstaat São Paulo auf den niedrigsten

Stand seit 17 Jahren sinken ließ (Gozzo et al., 2022). 2020 und 2021 fielen erneut ungewöhnlich geringe Niederschläge. Die Abholzung des Amazonasregenwalds gilt als einer der Haupttreiber für zunehmende Dürren in Brasilien: Der Regenwald des Amazonas befördert große Mengen Feuchtigkeit in die Atmosphäre, die als Niederschläge auch im Süden und im Zentrum Brasiliens wieder abregnen; dieses Phänomen wird als „flying rivers“ beschrieben (Getirana et al., 2021; Fearnside, 2021). Neben dem Klimawandel wirkte auch die El Niño-Periode zwischen 2012–2015 krisenverschärfend.

Maßnahmen der Regierung: Für den Fall einer akuten Wasserkrise wurde ein Notfallplan zur Versorgung der 500 wichtigsten Gebäude, z. B. Krankenhäusern, Verwaltung, Gefängnissen und Polizei, entwickelt, der aber aus Furcht vor Unruhen nicht öffentlich gemacht wurde. Der Großteil der Wasserversorgung hätte dann über Vergabestellen an öffentlichen Plätzen erfolgen müssen (Watts, 2017). So weit kam es dank rechtzeitig fallender Niederschläge nicht.

Im Jahr 2014 führte der Bundesstaat São Paulo finanzielle Anreize für effizientere Wassernutzung mit Informationskampagnen und einem Bonusprogramm beim Wassersparen ein, wodurch der Verbrauch um 17 % zurückging. Nachdem die Krise im März 2016 als überwunden galt, wurde dieses Bonusprogramm wieder beendet, was als kurzsichtige Entscheidung kritisiert wurde (Slater, 2019). Senkungen des Verbrauchs und der Verluste durch undichte Leitungen sollten durch einen niedrigeren Wasserdruck in den Leitungssystemen erreicht werden, was zu einer zeitweiligen Unterbrechung der Wasserversorgung führte und mit einem erhöhten Risiko für Wasserverschmutzung verbunden war (Watts, 2017; Soriano et al., 2016). Am Ende gelang es nicht, das Wasserdefizit auszugleichen, und die Wasserverfügbarkeit in São Paulo brach im Verlauf des Jahres 2014 um 74 % ein. Proteste waren die Folge (Slater, 2019).

Die Maßnahmen der Regierung des Bundesstaats São Paulo wurden vielfach als zu teuer und als zeitlich schlecht getaktet kritisiert (Soriano et al., 2016; Slater, 2019). Die damals beschlossenen großen Infrastrukturprojekte, die nicht ad hoc realisiert werden konnten, wie z. B. der Bau von Kanälen und Reservoirs oder die Beschaffung von Wasser aus anderen Bundesstaaten, waren als kurzfristige Lösungsansätze ungeeignet. Die Verbesserung der Wasserspeicherkapazität im Einzugsgebiet des Cantareira-Systems mit naturbasierten Ansätzen wird bisher noch kaum diskutiert, bietet aber als „unsichtbares Reservoir“ ein großes Potenzial.

differenziertere Übersicht ergeben Daten über den Zugang zu Wasser und den Wasserverbrauch, aufgeschlüsselt nach sozioökonomischen Gruppen und Stadtquartieren (Savelli et al., 2023). Auch politische Entscheidungen für die urbane Wasserversorgung folgen nicht immer den grundlegenden Notwendigkeiten oder Gerechtigkeitskriterien, etwa wenn Wasser aus hochmodernen Entsalzungsanlagen für industrielle Zwecke genutzt wird,

anstatt für die Grundversorgung der Bevölkerung. Im Krisenfall entsteht Konflikt- und Protestpotenzial besonders dann, wenn Entscheidungen über prioritäre Versorgung oder Rationierung intransparent getroffen und unzureichend oder verspätet kommuniziert werden. Hierbei handelt es sich vielfach um Politikversagen.

Kasten 4.2-2

Wasserkrise 2019 in Chennai, Indien: Wassermangel in einer der niederschlags- reichsten Megastädte der Welt

Indiens viertgrößte Stadt Chennai (11 Mio. Menschen leben in der Metropolregion) war im Juni 2019 von der stärksten Wasserkrise seit 30 Jahren betroffen, die analog zur Wasserkrise in Kapstadt auch als Day Zero Crisis bezeichnet wurde. Nur wenige Jahre zuvor (2015) erlebte die Stadt die schwerste Überflutung seit 100 Jahren. Obgleich Chennai mit 1.400 mm Jahresniederschlag über dem indischen Mittel liegt, weist die Stadt die geringste Pro-Kopf-Wasserverfügbarkeit unter den indischen Megastädten auf (Kalia, 2020). Der Grundwasserspiegel sinkt seit Jahren. Nachdem alle vier großen Wasserspeicher der Stadt aufgrund zu geringer Monsunniederschläge (90 % der Niederschläge fallen während des Nordostmonsuns im November und Dezember) auf unter 1 % ihres Füllstands gefallen und damit praktisch ausgetrocknet waren, geriet die Wasserversorgung der Stadt in die Krise. Die vier Reservoirs sichern normalerweise 60 % der Wasserversorgung der Stadt, während der Trockenzeit wird die Wasserversorgung über die Nutzung von Grundwasser gesichert, der Rest wird über Tanklastwagen angeliefert. Im Juni 2019 waren auch die Grundwasservorräte erschöpft. Das Grundwasser der Stadt ist übernutzt (Kalia, 2020). Die Wasserversorgung der Stadt konnte während dieser Krise nur durch die zusätzliche Beschaffung von Trinkwasser mit Lastwagen und Zügen gewährleistet werden, die Preise für Wasser in Flaschen vervierfachten sich (Mukherjee, 2022). Dürren verändern auch die Dynamik der Grundwasserverschmutzung, was zu erhöhten Gesundheitsrisiken führt, wenn diese Quellen für die städtische Wasserversorgung genutzt werden (IPCC, 2022b: 926). Beispielsweise kann es nach Dürreperioden zu einer verstärkten Schadstoffanreicherung im Grundwasser kommen. Ebenso sinkt in langanhaltenden Trockenperioden der natürliche Abfluss in Oberflächengewässern, so dass der Anteil des Klärwassers (Kläranlagenabfluss) und der darin enthaltenen Stoffe und Keime entsprechend steigt, was sich direkt auf aquatische Ökosysteme und indirekt auf die Trinkwassergewinnung (über Uferfiltrat) auswirkt (Karakurt et al., 2019). In Chennai führte die erzwungene Nutzung weniger sicherer Wasserressourcen und die damit einhergehende reduzierte Körperhygiene zum verstärkten Ausbruch wasserbürtiger Krankheiten wie Typhus, Cholera und Wurmerkrankungen (Mukherjee, 2022).

Auslöser der Krise waren zu geringe Monsunniederschläge zwischen 2016 und 2018. Die Monsunsaison 2018 war die trockenste seit Beginn der Messungen, die Niederschläge erreichten

nur rund 60 % des Durchschnittswerts (Mukherjee, 2022). Die Hitzewelle von Mai bis Juni 2019 führte dann zu einer akuten Versorgungskrise. Die tieferen historischen Ursachen liegen in der umfangreichen Trockenlegung und Verfüllung (oft mit Müll) von Wasserkörpern im Stadtgebiet und der Umgebung, um Platz für den Bau von Gebäuden und Infrastrukturen der rasch wachsenden Metropole zu schaffen. Traditionell verfügte Chennai über ein jahrhundertealtes Netzwerk von Flüssen, Seen, Feuchtgebieten sowie Be- und Entwässerungssystemen, die die Grundlage der Bewässerungslandwirtschaft ausmachten und einen wichtigen Puffer für die Trockenzeit darstellen. Die massive Versiegelung im Zuge der rapiden Verstädterung führte dazu, dass die Wasserspeicherkapazität der Stadt drastisch reduziert wurde und bei Starkniederschlägen die Überflutungsgefahr stark anstieg. Zudem sank durch die steigende Zahl privater, immer tiefer gebohrter Brunnen der Grundwasserspiegel stark ab, teilweise drang in der inzwischen dicht bebauten Küstenzone Chennais auch Salzwasser in das Grundwasser ein (Mukherjee, 2022). Zwischen 1893 und 2017 sank die Fläche der Oberflächengewässer der Stadt von 12,6 km² auf 3,2 km² (Bhalla, 2021). Allein zwischen 2010 und 2020 hat das schnell wachsende Chennai 33 % seiner Feuchtgebiete und 24 % seiner Agrarflächen verloren (Mukherjee, 2022). Künftig wird das Klima im Süden Indiens trockener und heißer werden und diesen Trend verstärken.

Indien hat seit 1987 eine National Water Policy, um die Planung und Entwicklung seiner Wasserressourcen zu steuern (Mukherjee, 2022). Der südindische Bundesstaat Tamil Nadu hat 1994 seine Wasserpolitik daran ausgerichtet, aber diese bisher nicht an die Aktualisierung der National Water Policy von 2012 angepasst, in der u. a. die Anpassung an den Klimawandel und ökologische Aspekte des Wasserhaushalts prominent verankert sind. Bereits seit 2003 müssen auf allen Gebäuden Vorrichtungen zum Auffangen von Regenwasser installiert werden und 2010 wurde in Chennai die größte Entsalzungsanlage (Umkehrosmose) Indiens errichtet (UNICEF, 2021).

Maßnahmen der Regierung: Als kurzfristige Maßnahme wurde während der Krise Trinkwasser über große Distanzen mit Lastwagen und Zügen herangeschafft und an öffentlichen Ausgabestellen verteilt. Als langfristige Maßnahme sind zur Verbesserung der Wasserinfrastruktur z. B. weitere Entsalzungsanlagen geplant. Darüber hinaus soll das Monitoring der Wasserressourcen verbessert, die Leitungsinfrastruktur ertüchtigt und die Wassernutzung effizienter gemacht werden. Die Initiative „City of 100 Tanks“ hat zum Ziel, die früher im Umfeld von Tempeln existierenden Wasserreservoirs wieder zu errichten. Es sollen Grünflächen angelegt werden, um die Wasserspeicherkapazität zu verbessern.

4.2.3

Herausforderungen

Für die Bewältigung der Wasserknappheit in Städten ergeben sich u. a. folgende Herausforderungen (Kap. 6.4):

1. *Geeignete Maßnahmen identifizieren und beschleunigt umsetzen:* In vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens hinkt der Auf- und Ausbau von Infrastrukturen für eine sichere und zuverlässige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung der raschen Verstädterung hinterher (Flörke et al., 2018).

2. *Potenziale und Grenzen des gesamten Wassereinzugsgebiets berücksichtigen:* Um geeignete Maßnahmen zu entwickeln, benötigen Städte, die von Wasserknappheit betroffen sind, eine Bestandsaufnahme über das heutige, regional nachhaltig nutzbare Wasserdargebot. Unter den Bedingungen des fortschreitenden Klimawandels ist dies auch als Grundlage für den Aufbau von Frühwarnsystemen essenziell. Neben der Identifizierung geeigneter technischer Lösungsoptionen kann eine Abschätzung der naturbasierten Potenziale, also der Beiträge der Natur wie

etwa Wasserspeicherfähigkeit einer Stadtregion (grünes und blaues Wasser), Orientierung für die nachhaltige maximale Größe einer von Wasserknappheit bedrohten Stadt geben. Die Leistungen und Potenziale der Natur für den urbanen Wasserhaushalt wurden in der Vergangenheit vielfach übersehen und können auch bei der Anpassung der Städte an den Klimawandel eine wichtige Rolle spielen.

3. *Informelle Siedlungen und informelle Stadtquartiere infrastrukturell aufwerten:* Informelle Siedlungen, für die künftig starke Wachstumsraten erwartet werden, sind besonders von unsicherer Wasserversorgung und Abwasserentsorgung betroffen und im Krisenfall häufig existenziell gefährdet. Gerade dort zögern die Planungsbehörden oftmals, Infrastrukturen aufzubauen.
4. *Datenqualität über den Zugang zu Wasser und Wasserverbrauch verbessern:* Durchschnittswerte zur Wassersituation in Städten bilden oft nicht das ganze Bild ab, weil der Zugang zu Wasser und der Wasserverbrauch zwischen den Quartieren und sozialen Gruppen oft sehr unterschiedlich ist. Die urbane Datenerhebung sollte deshalb stärker räumlich und sozial differenziert sein.
5. *Monitoring der Umsetzung gesetzgeberischer Vorgaben und klare Verantwortungszuweisung sichern:* In Städten bzw. Quartieren, in denen eine formelle Wasserversorgung etabliert ist und geeignete gesetzgeberische Vorgaben für einen nachhaltigen Umgang mit Wasser vorhanden sind, sollte es ein Monitoring für die Umsetzung dieser Vorgaben geben. Vielfach fehlt auch die Einbindung relevanter Disziplinen. Die Wasserstände der kommunalen Wasserressourcen müssen dabei kontinuierlich überwacht werden. Für den Fall einer akuten Wasserkrise (z. B. bei Ausrufung eines Wassernotstands) müssen Notfallpläne erarbeitet werden – einige Städte haben bereits damit begonnen.
6. *Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen sichern:* Der Finanzierungsbedarf zur Errichtung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen ist angesichts der hohen Urbanisierungsdynamik und den sich ändernden Bedingungen durch den Klimawandel eine ständige Herausforderung. Die Verbesserung der Wassernutzungseffizienz und andere Maßnahmen erfordern besser angepasste Lösungen, verbunden mit einer anderen Prioritätensetzung der Investitionen und vorhandenen Mittel, bei gegebenen Finanzierungsspielräumen.
7. *Grenzen des Städtewachstums planerisch in Szenarien berücksichtigen:* Schließlich gibt es auch Städte, die das Problem der Wasserknappheit allein mit Infrastrukturmaßnahmen nicht wirksam werden lösen können (z. B. Neu-Delhi, Lahore, Kapstadt oder Lima). Oftmals wachsen solche Städte weiterhin stark an.

Hier erschweren die Übernutzung und Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwasser, ein ineffizientes urbanes Wassermanagement (z. B. Wasserverluste durch Leckagen, hohe Wasserverbräuche durch Industrie und Haushalte, unzureichende vorausschauende Planung oder Korruption), Degradation von Naturräumen, mangelnde finanzielle Ressourcen und der zunehmende Druck durch ein abnehmendes Wasserdargebot das Umsteuern in Richtung nachhaltiger Wassernutzung. Dies kann frühe Grenzen der Anpassung setzen und eine unzureichende Wasserversorgung bewirken. Dort, wo die notwendigen Wassermengen nicht mehr verfügbar sind, der Energieaufwand zur Wassergewinnung zu groß und der Ferntransport von Wasser zu aufwändig ist, steht weiteres Städtewachstum nachhaltiger Entwicklung entgegen. Verschärfend wirkt häufig auch der hohe Wasserbedarf thermischer Kraftwerke in Ballungsräumen. Hier stellt sich die Frage nach den lokalen Grenzen urbaner Expansion („limits to growth in cities“; Cremades et al., 2021; He et al., 2021). Wenn alle zur Verfügung stehenden Mittel ausgeschöpft sind und Zuzugsbeschränkungen nicht ausreichend waren, ist bei einer absehbar existenziell bedrohten Wasserversorgung ein rechtzeitig organisierter, geordneter Rückzug von Teilen der Bevölkerung ggf. die einzig sinnvolle Option.

8. *Notfallvorsorge und resiliente Gesundheitsstrukturen aufbauen:* Im Falle einer urbanen Wasserkrise kann es zu einem erhöhten Auftreten wasserbürtiger Krankheiten kommen. Gesundheitssysteme können hier schnell an ihre Grenzen stoßen bzw. durch Extremereignisse wie Überschwemmungen überfordert werden. In Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sind besonders informelle Stadtquartiere betroffen. Die Verunreinigung von Wasser mit Krankheitserregern aufgrund unzureichender Abwasser-systeme und in Folge von Überschwemmungen sowie die verstärkte Nutzung verunreinigten Wassers bei Wasserknappheit begünstigen die Ausbreitung von Infektionskrankheiten (z. B. Durchfallerkrankungen), verbunden mit dem Risiko der Entstehung von Epidemien. Insbesondere Flucht in andere Stadtquartiere bzw. Regionen kann zur Verbreitung beitragen. Notfallpläne, die die vulnerablen und informellen Quartiere besonders im Blick haben, und resiliente Strukturen in den Gesundheitseinrichtungen können diese Dynamiken wirkungsvoll dämpfen und die Ausbreitung von Seuchen verhindern oder zumindest eindämmen (Grimm et al., 2022; Kruk et al., 2017; Truppa et al., 2024). Beispiele sind das Anlegen von Trinkwasserreserven, Desinfektionseinrichtungen sowie Notfallreserven an Hygieneartikeln, Medikamenten und medizinischem Bedarf an sicheren

Orten. Entsprechende Maßnahmen müssen an die örtlichen Gegebenheiten unter Einbeziehung der örtlichen Behörden und Organisationen angepasst werden – wo nötig, mit der Unterstützung der Vereinten Nationen und nicht staatlicher Hilfsorganisationen.

Der zunehmende Wassermangel in Städten und urbanen Agglomerationen ist ein wachsendes globales Problem, das viele Menschen betreffen könnte und ungelöst ein erhebliches Destabilisierungspotenzial birgt. Dieses Problem verdient daher verstärkt Aufmerksamkeit in der internationalen Nachhaltigkeitspolitik, aber auch in der bi- und multilateralen Zusammenarbeit, und erfordert engagiertes, vorausschauendes Handeln. Die Transformationsforschung für nachhaltige Stadtentwicklung leistet hier wichtige Beiträge (BMBF, 2023).

4.3

Zunahme von Dürren und Sturzfluten in der MENA-Region



- 6%**
der Weltbevölkerung leben in der MENA-Region
- nur 1%**
der globalen Süßwasservorräte ist dort verfügbar
- um 24%**
sank die Pro-Kopf-Verfügbarkeit von
erneuerbarem Süßwasser 2007–2018

Die MENA-Region (Middle East and North Africa, Mittlerer Osten und Nordafrika) ist als semiarides bzw. arides Gebiet seit jeher von knappen Wasserressourcen geprägt (Fragaszy et al., 2020; Ozturk et al., 2021). Aktuell leben in der Region knapp 6 % der Weltbevölkerung, jedoch befindet sich nur etwa 1 % des weltweiten erneuerbaren Süßwassers in den MENA-Ländern (Fragaszy et al., 2020; Namdar et al., 2021). Im Zeitraum von 2007–2018 sank die Verfügbarkeit von erneuerbarem Süßwasser pro Tag und Kopf in der Region im Durchschnitt um etwa 24 % (SIWI und UNICEF, 2023). Veränderte Niederschlagsmuster, zunehmende Trockenheit und Dürren, Starkregenereignisse und Sturzfluten sowie insbesondere Übernutzung, begleitet von großen Governanceherausforderungen bei der gerechten Verteilung der wenigen verfügbaren Süßwasserressourcen in der Region, führen bereits heute zu Wasserknappheit und ungleicher Wasserverfügbarkeit für Mensch und Umwelt. Die heutigen Herausforderungen sind primär politisch geprägt, zukünftig wird jedoch durch die projizierten Klimaveränderungen und den zunehmenden Nutzungsdruck die Wasserknappheit in der Region voraussichtlich weiter ansteigen und die Situation für Mensch und Natur verschärfen (Kap. 3).

4.3.1

Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen

Die letzten Dekaden gehörten in der MENA-Region zu den trockensten des letzten Jahrtausends, begleitet von zunehmenden Dürreperioden (Fragaszy et al., 2020). Neben den zunehmend spürbaren Auswirkungen des Klimawandels sind dabei insbesondere die jahrelange starke Übernutzung der Oberflächengewässer und vor allem der Grundwasserleiter, eine qualitativ unzureichende Wiederverwendung von Wasser sowie die fehlende Regulierung von Wasserentnahme und -verschmutzung aufgrund unzureichender Governance das Problem (Hall, 2024; Oberhauser et al., 2023). Gleichzeitig hat die Region in den letzten zwei Dekaden eine Verschiebung der Niederschlagsmuster erlebt (Loudyi und Kantoush, 2020). Starkregenereignisse und Sturzfluten sind eine wachsende Bedrohung in einigen der trockensten Regionen der Welt (Yin et al., 2023). Aktuelle Beispiele in der MENA-Region sind der Starkregen und die Überschwemmungen durch den Sturm Daniel im Herbst 2023. Die Überflutungen in Libyen, die durch den Dammbruch des Mansour- und des Derna-Damms ausgelöst wurden, forderten mehr als 4.000 Todesopfer, mehr als 8.000 Menschen werden immer noch vermisst und mehr als 40.000 Menschen wurden zu Binnenflüchtlingen (OCHA, 2023). Die MENA-Region ist nicht an Starkregenereignisse „gewöhnt“, die teils übernutzten, durch Trockenheit und Dürre ausgetrockneten Böden können die Wassermengen kurzfristig nicht aufnehmen (Yin et al., 2023) und auch Infrastrukturen und Entwässerungssysteme sind häufig unzureichend oder nicht vorhanden (Loudyi und Kantoush, 2020). Zusätzlich liegen Siedlungen meist in der Nähe von Flüssen oder in Überschwemmungsgebieten (Yin et al., 2023). Das Überschwemmungs- und Dürreerisiko nimmt weiter zu und wird voraussichtlich vor allem sozial benachteiligte und arme Bevölkerungsgruppen unverhältnismäßig stark treffen (World Bank, 2018).

Die MENA-Region wird gleichzeitig mit am stärksten von den negativen Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein; viele der MENA-Länder werden sehr wahrscheinlich deutlich heißere und trockenere Bedingungen erleben (Lange, 2019; Namdar et al., 2021; Hajat et al., 2023). Neben mehr Trockenheit und länger anhaltenden Dürren werden auch mehr Starkregenereignisse, Überschwemmungen und Sturzfluten prognostiziert (Seneviratne et al., 2021; Ozturk et al., 2021; Yin et al., 2023; Kap. 3.1.1). Hitzeextreme werden intensiver und häufiger und überschreiten für den Menschen tolerierbare Bedingungen, was unter anderem auch zu einer höheren Sterblichkeit führen wird (IPCC, 2021; IPCC, 2022a; Hajat et al., 2023). Gleichzeitig erhöht sich das Risiko für Überschwemmungen und Versalzung in den Küstenregionen und tiefliegenden Deltas durch den Anstieg

des Meeresspiegels. Ein Großteil der Bevölkerung lebt an den Küsten, insbesondere in den nordafrikanischen Ländern der MENA-Region (Lange, 2019; World Bank, 2018). Viele Hauptstädte und Verwaltungszentren befinden sich in Küstenregionen; ihre Infrastrukturen sind somit sehr anfällig. Viele Städte in der Region haben außerdem keine angepasste Infrastruktur, um mit Sturzfluten wie denen der letzten Jahren umzugehen (Loudyi und Kantoush, 2020).

4.3.2

Zunehmende Wasserknappheit: Negative Folgen für Mensch und Natur

Durch die fortschreitenden Klimaveränderungen wird die Wasserknappheit in der MENA-Region weiter steigen (Namdar et al., 2021). So werden die häufiger und intensiver auftretenden Dürren eine erhebliche Wasserknappheit und negative sozioökonomische Folgen nach sich ziehen. Der gleichzeitig zunehmende Nutzungsdruck wird diese Situation weiter verschärfen. Global betrachtet erwartet die Region die größten wirtschaftlichen Verluste durch klimabedingte Wasserknappheit (6–14 % des Bruttoinlandsprodukts bis 2050; World Bank, 2018). Dürren gehören in wirtschaftlicher und sozialer Hinsicht zu den „kostspieligsten“ Naturgefahren (Fragaszy et al., 2020). Sie wirken sich erheblich auf Staatshaushalte, Exporterlöse und Importrechnungen in der Region aus, tragen zu sozialen Ungleichheiten, Landflucht und politischen Unruhen bei (Fragaszy et al., 2020) und wirken sich zudem negativ auf die Gesundheit aus (Kap. 3.3.2). Auch Staub- und Sandstürme, die durch Dürren und degradiertes Land begünstigt werden, führen zu Wohlstandsverlusten in der Region, die sich auf etwa 150 Mrd. US-\$ jährlich belaufen (Keynoush, 2022). Gleichzeitig nimmt die Wahrscheinlichkeit für ein vermehrtes Auftreten von Überschwemmungen und Sturzfluten in dieser Region zu, mit entsprechenden Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die Zahl der Todesopfer, das Ausmaß wirtschaftlicher Schäden, weitere Kosten und eine mögliche Notwendigkeit des Rückzugs werden zusätzlich durch die Auswirkungen des progressiven Meeresspiegelanstiegs erhöht (Lange, 2019; Kap. 3.1.1.6, 3.3.2).

4.3.2.1

Schwindende Wasserressourcen durch nicht nachhaltige Nutzung

Die zunehmende Wasserknappheit ist für die Ernährungssicherheit in der MENA-Region jetzt und in Zukunft eine große Herausforderung (Keulertz, 2019; Tull, 2020). Dies wird unter anderem davon beeinflusst, wie die verbleibenden Wasserressourcen genutzt werden. In der MENA-Region ist mehr als die Hälfte des Wasserverbrauchs (vor allem aus Grundwassernutzung) nicht nachhaltig, d. h. es wird mehr Wasser verbraucht, als auf erneuerbarer Basis zur Verfügung steht (Global Blue Water Sustainability Index for Surface and Ground Water; World Bank, 2018: 12 f.). Sie ist somit einer der „globalen Hotspots der nicht nachhaltigen Wassernutzung“ (World Bank, 2018: 38). Nicht nachhaltige Wassernutzung und Wasserverschmutzung bedrohen außerdem Süßwasser- und marine Ökosysteme in der Region. Schätzungen zufolge sind allein auf der Arabischen Halbinsel derzeit 17 % der Süßwasserarten vom Aussterben bedroht (World Bank, 2018).

Ein Großteil des regionalen Wasserverbrauchs ist auf die Landwirtschaft zurückzuführen. Das umfasst auch Verluste in der Landwirtschaft, bei der Verarbeitung, im Vertrieb und beim Konsum (World Bank, 2018). Insbesondere die Bewässerungspraktiken der Landwirtschaft stellen hierbei eine enorme Gefahr für viele Grundwasserleiter in der Region dar (Abb. 4.3-1; Gaub und Lienard, 2021). Schwankungen des Oberflächenwasserdargebots werden ausgeglichen, indem Grundwasser genutzt wird, um Wasserversorgung und Einkommen für die Landwirtschaft zu sichern (World Bank, 2018). Diese Grundwasserressourcen sind jedoch endlich. Auch die steigende Wasserverschmutzung durch Abwässer und das Eindringen von Salzwasser beeinträchtigt die Verfügbarkeit von Wasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Die Verschmutzung von Süßwasser und marinen Gewässern resultiert in gesundheitlichen Schäden aufgrund wasserbürtiger Krankheiten bis hin zum Verlust von Ökosystemleistungen, z. B. der Versorgung mit Nahrung durch die Fischerei (World Bank, 2018).

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Politiken in der MENA-Region keine nachhaltige Nachfrage nach Wasser gefördert und auch die Wasserverschwendung wurde nicht verringert. Die Bewässerungslandwirtschaft expandierte seit den 1950er Jahren, die Regierungen bauten hunderte Staudämme, die Bevölkerung wuchs und ihr Lebensstandard stieg (1950–2000: Vervierfachung auf etwa 380 Mio. Menschen; Hall, 2024). Schon in den 1980er und 1990er Jahren wurde das Grundwasser in Syrien, Jordanien und im Jemen nicht mehr nachhaltig verwendet. Viele Staaten subventionierten Diesel, was u. a. dazu führte, dass Landwirt:innen Grundwasser aus immer größeren Tiefen pumpen konnten. Das Zusammenwirken von Bevölkerungswachstum und einer nicht

nachhaltigen, „ehrgeizigen“ Agrarpolitik führte zum Verlust von Süßwasserressourcen. Oasen und Wasserwege wie Tigris, Euphrat und Jordan sind nur noch ein Rinnsal, aufgrund der Agrarpolitik aber auch wegen des Baus von Dämmen. Neben anderen ungeklärten Abwässern verschmutzen auch die landwirtschaftlichen Abflüsse die Süßwasserressourcen und verknappen sie weiter. Die Unumkehrbarkeit des Zustands der nicht erneuerbaren und übernutzten Süßwasserressourcen, insbesondere der endlichen Grundwasserressourcen, wirken sich nun zwangsweise auch auf Politiken aus. Die irakische Regierung subventionierte früher beispielsweise Diesel, Wasser, Saatgut, Düngemittel und Pestizide oder stellte sie kostenlos zur Verfügung. Im Jahr 2022 hat das irakische Landwirtschaftsministerium die Bewässerung für die Landwirtschaft um 50 % gekürzt. Die autonome Verwaltung von Nord- und Ostsyrien hat das Wasser für die Landwirtschaft rationiert (Hall, 2024).

Die Bevölkerung dieser ariden und semiariden Region ist von den wenigen Flusssystemen, Feuchtgebieten und grundwassergespeisten Oasen abhängig, doch die Auswirkungen des Klimawandels und die anhaltende Übernutzung schädigen diese Ökosysteme nachhaltig. Degradierte Ökosysteme verstärken regionale Megatrends wie Migration, verlassenes Land beschleunigt wiederum die Bodendegradation in ländlichen Gebieten (Houdret und von Lossow, 2023; Hall, 2024). Durch den zunehmenden Verlust der Bodenfeuchte, veränderte Niederschlagsmuster bzw. -mengen und extreme Temperaturbedingungen wird dieser negative Trend auch in Zukunft weiter zunehmen (IPCC, 2023).

Der Agrarsektor verbraucht in der Region bereits heute mehr Süßwasser (85 %; Abb. 4.3-1; IWMI, 2024) als im weltweiten Durchschnitt (~70 %) und der Verbrauch könnte in Dürrejahre zukünftig noch höher ausfallen (World Bank, 2023). Viele Staaten in der Region sind von der Landwirtschaft als Beschäftigungs- und Einkommensquelle abhängig, in Marokko sind es beispielsweise fast 30 % der Bevölkerung (World Bank, 2023). Die Grundlagen für die Erhaltung dieses Sektors schwinden jedoch zunehmend, wie bereits in Nordsyrien, Südirak und Jordanien beobachtet werden kann (Houdret und von Lossow, 2023). Es wird erwartet, dass das Grundwasser bis 2050 um ein Drittel gesunken sein wird. Gebiete, deren Landwirtschaft von Oberflächenwasser und Regen abhängt, werden am stärksten vom Niederschlagsrückgang betroffen sein (Abb. 4.3-1). Auch wasserintensive Agrarexporte verbrauchen in einigen Ländern der Region aktuell sehr viel Wasser.

Da der individuelle Zugang zu Grundwasser von den jeweiligen finanziellen, technischen und sozialen Ressourcen abhängt, stehen die Wasserressourcen in überproportional großen Anteilen lokal einflussreichen Gruppen oder Unternehmen zur Verfügung (z. B. große

Agrarunternehmen). Der Bevölkerungsmehrheit stehen dann geringere Mengen Wasser für ihre Produktions- und Lebensgrundlage zur Verfügung (Houdret und Amichi, 2022; Oberhauser et al., 2023; Hall, 2024).

Die Region ist Nettoimporteur von virtuellem Wasser. Der größte Anteil der virtuellen Wasserströme entfällt auf den Import von Nahrungsmitteln, hierbei sind Getreide und hochwertige Lebensmittel die wichtigsten landwirtschaftlichen Erzeugnisse, die mit dem Import virtuellen Wassers in Verbindung gebracht werden (Antonelli et al., 2017). So sind z. B. die weltweit neun größten Weizenimporteure MENA-Länder (Abouelnaga, 2019). Die MENA-Region importiert virtuelles Wasser aus jeder Region der Welt, die USA sind hierbei der größte Einzelexporteur, gefolgt von Argentinien, Australien und Brasilien (Abb. 4.3-2). Damit geht eine hohe Vulnerabilität gegenüber Preisschwankungen auf dem Weltmarkt einher, insbesondere für sozial benachteiligte bzw. einkommensschwache Bevölkerungsgruppen.

4.3.2.2

Auswirkungen auf politische und gesellschaftliche Stabilität und Konflikte

Generell weist die MENA-Region ein hohes Maß an politischer Instabilität auf und sie leidet seit Jahrzehnten unter Konflikten (Namdar et al., 2021). Diese sind zum Teil historisch gewachsen und religiös, ethnisch sowie aus den Unterschieden zwischen gesellschaftlichen Schichten motiviert, aber auch geopolitische Einflussmächte tragen zu den Spannungen bei. Gleichzeitig führen die Auswirkungen des Klimawandels zu weiteren Polarisierungen und gesellschaftlichen Spannungen (Kap. 3.2.2; Gleick, 2014; Falkenmark et al., 2019; Abouelnaga, 2019). Der Klimawandel kann daher einerseits das Risiko erhöhen, dass der grenzüberschreitende Wasserwettbewerb zwischen den Staaten bzw. Ländern in der MENA-Region direkte oder stellvertretende Konflikte hervorbringt. Andererseits zeigen einige Analysen, dass sich dadurch eine Gelegenheit für bilaterale Zusammenarbeit und Diplomatie bieten kann (Wehrey und Fawal, 2022), weil er einen Anstoß für weniger politisch heikle Ansatzpunkte für die regionale Zusammenarbeit im Wasserbereich bietet (Houdret und von Lossow, 2023). Zwei Drittel der Süßwasserressourcen im Mittleren Osten stammen aus transnationalen Quellen. Ein Beispiel sind die Staudämme in der Türkei, die dazu beigetragen haben, dass die Wassermenge im irakischen Teil des Euphrat-Tigris-Beckens in den letzten vier Jahrzehnten um 30 % zurückgegangen ist (Houdret und von Lossow, 2023). Die politische Stabilität in der Region kann darüber hinaus durch innerstaatliche (zivile) Konflikte geschwächt werden, die durch z. B. geringere Wasserverfügbarkeit und damit einhergehende höhere Lebensmittelpreise oder durch dürre- oder überschwemmungsbedingte Migrationsbewegungen

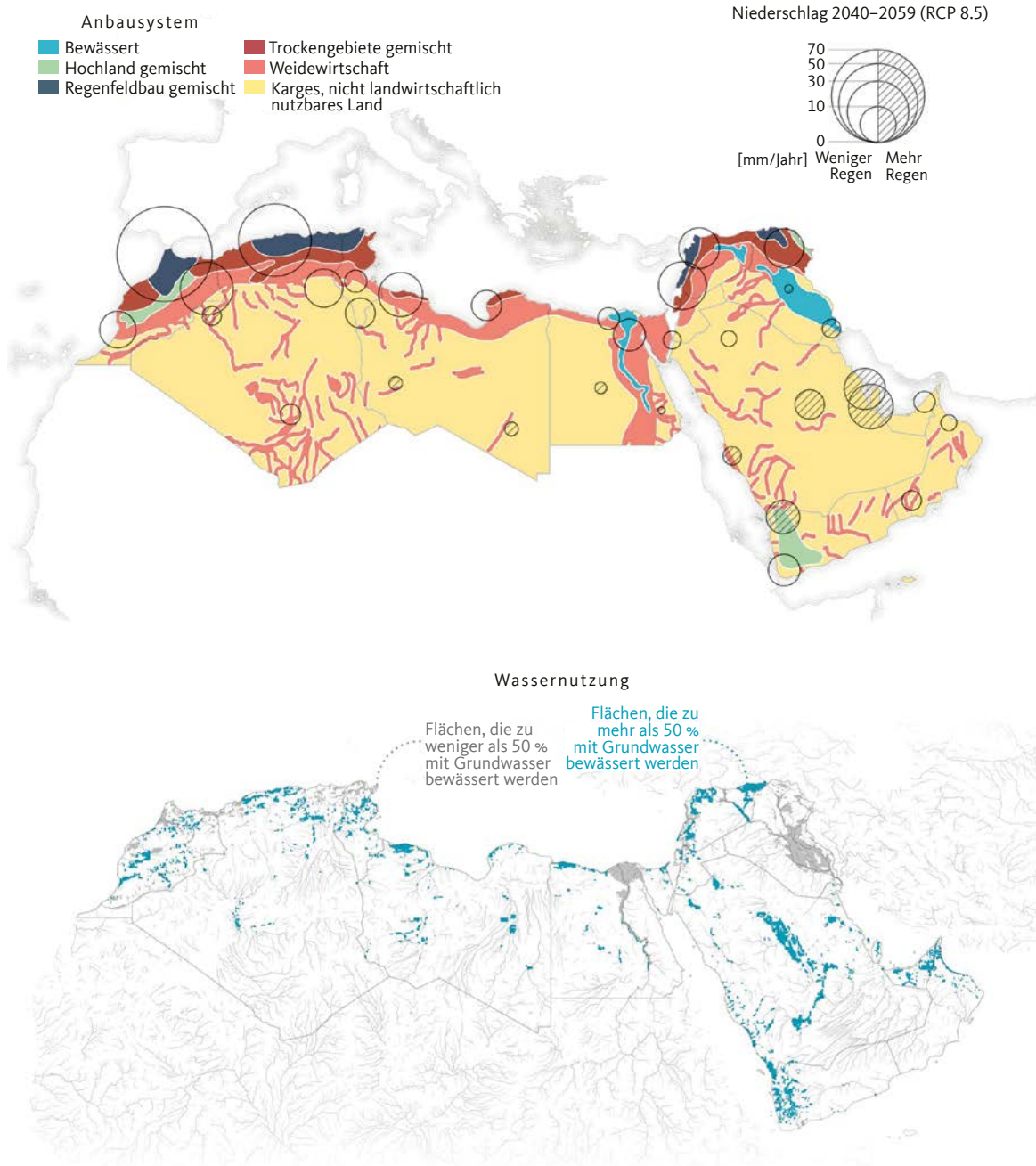


Abbildung 4.3-1

Prognostizierte Niederschlagsänderungen und Wasserverbrauch der Landwirtschaft in der MENA-Region. Die obere Abbildung zeigt prognostizierte Niederschlagsänderungen in der MENA-Region von 2040–2059 unter dem RCP8.5-Szenario: Die Veränderungen variieren für die Region. Insbesondere Gegenden, wo Oberflächen- und Regenwasser Hauptbewässerungsquellen sind, werden am stärksten von verminderten Niederschlägen betroffen sein. Die untere Abbildung zeigt den Anteil des Grundwassers am Gesamtwasserverbrauch der Landwirtschaft, die mit 85 % Hauptverbraucher in der Region ist. In vielen Teilen der Region trägt Grundwasser mehr als die Hälfte der Wassermenge für die landwirtschaftliche Bewässerung bei. Bis 2050 wird die Grundwasserverfügbarkeit voraussichtlich um ein Drittel abnehmen.

Quelle: Gaub und Lienard, 2021: 15

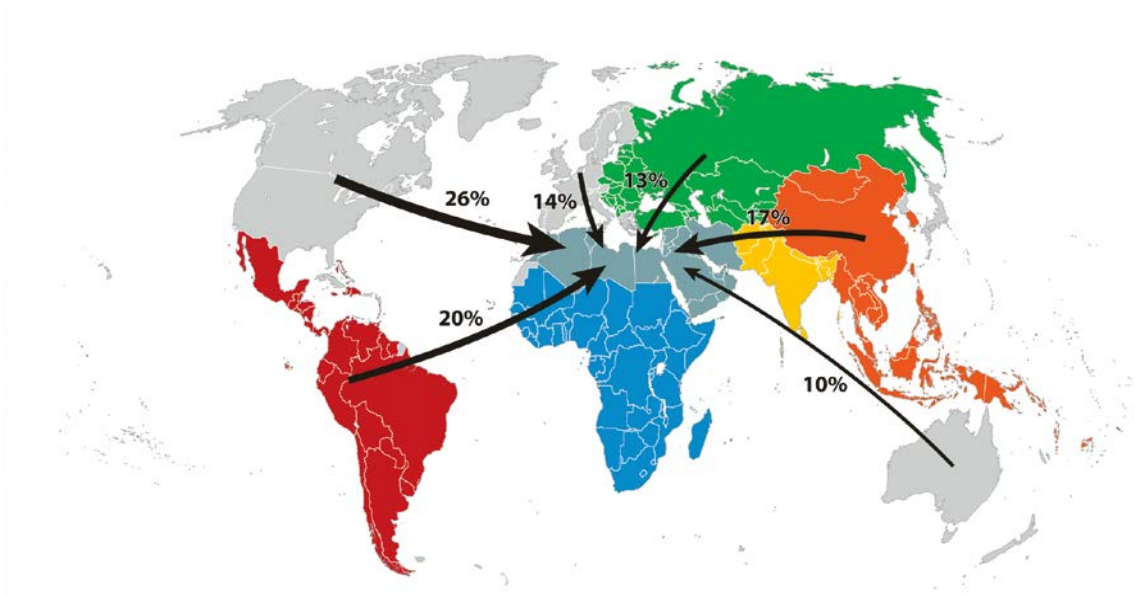


Abbildung 4.3-2

Virtueller Wasserhandel in der MENA-Region im Jahr 2015. Gezeigt wird der virtuelle Wasserhandel (netto) in der MENA-Region im Jahr 2015. Die Pfeildicke repräsentiert die relative Menge an importiertem Wasser. Zu den drei wichtigsten Importquellen gehören Nordamerika (26 % des importierten Wassers), Südamerika (20 %) und Asien (17 %).
Quelle: World Bank, 2018

entstehen können (World Bank, 2016a). Abhängig vom Ausmaß und der Schwere der zukünftigen Entwicklungen und den verfügbaren Ressourcen wird es daher zukünftig voraussichtlich mehr Binnenmigration in der MENA-Region geben, insbesondere aus ländlichen Gebieten in die Städte (Tull, 2020; Wehrey und Fawal, 2022). Dies verschärft wiederum die Herausforderungen im Hinblick auf die Wassersicherheit und Stabilität in der Region (World Bank, 2018; Kap. 4.2).

4.3.3

Zentrale Herausforderungen als Ansatzpunkte für politisches Handeln

Hoher Wasserkonsum und der Klimawandel können zu erhöhten Spannungen und einem gesteigerten Konfliktpotenzial in der Region führen (Houdret und von Lossow, 2023). Da Wasser ein zentraler Faktor des Gesellschaftsvertrags ist, also der Vereinbarungen zwischen gesellschaftlichen Gruppen und dem Staat über gegenseitige Rechte und Pflichten (Loewe et al., 2021), hat

es aus nationalstaatlicher Sicht das Potenzial, Konflikte zwischen den Nutzern sowie regierungsfeindliche Proteste zu entfachen. Im Libanon beispielsweise wirkte sich eine unzureichende Wasserversorgung sowohl auf das Vertrauen in die staatlichen Institutionen als auch auf die Spannungen zwischen einzelnen Gruppen negativ aus (Houdret und von Lossow, 2023). Dabei spielen zuverlässige Wasserverfügbarkeit, Schutz vor z. B. Fluten und Dürren oder Partizipation im Wasserressourcenmanagement (z. B. Verteilung, Zugang, Bepreisung) nicht nur eine wichtige Rolle für staatliche Legitimität, sondern auch für die Legitimität nicht staatlicher Akteure. Ein Beispiel sind die Bemühungen des sogenannten Islamischen Staats (IS) zur Verbesserung der Wasserversorgung in den von ihm besetzten Gebieten (Houdret und von Lossow, 2023). Auf Grundlage der beschriebenen Entwicklungen und Dynamiken in der MENA-Region zeichnen sich zwei zentrale zukünftige Herausforderungen ab: Effizientes Wassermanagement wird durch strukturelle Herausforderungen in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft erschwert und grenzüberschreitende Kooperationen im Wasserbereich werden zunehmend schwieriger.

4.3.3.1

Erschwertes Wassermanagement aufgrund struktureller Herausforderungen

Trotz unterschiedlicher länderspezifischer Herausforderungen in Bezug auf wirtschaftliche Entwicklung, Armutsbekämpfung und gesellschaftlichen Zusammenhalt gibt es in der MENA-Region strukturelle Herausforderungen, die die wasserbezogene Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel verringern. Neben fehlenden Kapazitäten der öffentlichen Institutionen sind dies z. B. die hohe Schuldenquote, Fragilität und Subventionen, die nicht mit der Anreizstruktur zur Förderung von Klimaanpassungsmaßnahmen zusammenpassen.

In vielen Ländern der MENA-Region erschweren weitere Probleme das Wassermanagement zusätzlich: Bewaffnete Konflikte machen Regionen zum Teil unzugänglich oder erhobene wasserbezogene Daten werden nicht ausreichend geteilt, was die Zusammenarbeit zwischen Sektoren und Staaten behindert. Hinzu kommt, dass Schwankungen in Menge und Qualität des Grundwassers unsichtbar sind und daher häufig vernachlässigt werden (Houdret und von Lossow, 2023). Die Übernutzung des Grundwassers kann dadurch schlimmstenfalls zum Versiegen führen. Die seit Jahrzehnten übernutzten Grundwasserressourcen (World Bank, 2018) stehen auch im Zusammenhang mit mangelnder Kontrolle illegaler Brunnen. Oftmals spielen z. B. politisch oder ökonomisch einflussreiche Gruppen (z. B. auch informelle neopatrimoniale Netzwerke) eine wichtige Rolle, die ihren Einfluss im Eigeninteresse nutzen. Sie sichern den Zugang zu Wasserressourcen, unterminieren dabei jedoch Initiativen zur Begrenzung der Wasserentnahme, die z. B. zum Schutz der Umwelt dringend erforderlich wären (Oberhauser et al., 2023; Hall, 2024; Faysse, 2015; Houdret, 2012). Negative Auswirkungen auf für sie relevante Sektoren (z. B. die Export-Landwirtschaft) werden abgewendet oder die Umsetzung der Initiativen wird verhindert. Darüber hinaus werden Wassergebühren nicht konsequent erhoben, z. B. für wasserintensive Verbräuche durch Unternehmen (Faysse, 2015).

Es zeigt sich: Die heutige Übernutzung der Grundwasserressourcen in der MENA-Region ist primär ein politisches Problem (Zeitoun et al., 2013; Sowers, 2012). Allerdings geht es dabei nicht nur um politische Stabilität, sondern es stellt sich auch die Frage, inwiefern die heutige Politikgestaltung im Umgang mit Wasserknappheit in der Region weiter zur gesellschaftlichen Fragmentierung beiträgt und so z. B. Verschärfungen hervorbringt, die in regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension münden können. Am Fallbeispiel Jordanien und dem Azraq Grundwasserspeicher konnte gezeigt werden, dass trotz Eingreifen auf operativer Ebene, die auf technische Aspekte wie z. B. Bewässerungseffizienz oder Verbesserungen der Wasserinfrastruktur abzielten, nur

geringe Effizienzgewinne erreicht werden konnten und allgemeine Übernutzungsmuster so nicht zu ändern sind. Eingriffe auf Verfassungsebene, z. B. die Zuweisung von Grundwasser, haben zumindest theoretisch das Potenzial, als Hebel zu wirken und die Selbstverständlichkeit des Zugangs zu Grundwasser für einflussreiche Teile der Gesellschaft zu verändern (Oberhauser et al., 2023).

4.3.3.2

Schwieriger werdende grenzüberschreitende Kooperation

Gründe dafür, dass grenzüberschreitende Zusammenarbeit zunehmend schwieriger wird, sind beispielsweise geostrategische Erwägungen wie die Nutzung von Wasser für eigene Interessen und wassermangelbedingte Spannungen, z. B. zwischen dem Iran, Saudi-Arabien, Russland, der Türkei und den USA sowie kurdischen Gebieten (Houdret und von Lossow, 2023). Konflikte können Wasserrisiken zudem verstärken, weil z. B. die Wasserinfrastruktur bei Konflikten angegriffen wird (Borgomeo et al., 2021). Trotz zahlreicher Initiativen ist die Wasserdiplomatie weitgehend zum Erliegen gekommen. Schweden hat zwar in Zusammenarbeit mit der Wirtschafts- und Sozialkommission der Vereinten Nationen für Westasien (UN-ESCWA) und der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) grenzüberschreitendes Wassermanagement in Vorbereitung auf die Verabschiedung der UNECE-Wasserkonvention (Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes) unterstützt. Es gibt aber bisher nur sehr wenige Abkommen, die regional nachhaltiges Wassermanagement in der MENA-Region regeln (Houdret und von Lossow, 2023). Dazu gehört auch die Wasserkonvention, mit deren Hilfe eine Bewertung des Nordwestsahara-Aquifersystems (NWSAS) erstellt werden konnte und somit die Entwicklung gemeinsamer Lösungsstrategien durch Algerien, Libyen und Tunesien ermöglichte (UNECE, 2024). Die Initiative „Blue Peace“ verfolgt grenzüberschreitend und multisektoral Investitionspläne und engagiert sich somit für Vertrauensbildung im Wassermanagement im Mittleren Osten.

Die hier beschriebenen Herausforderungen verdeutlichen, dass angesichts der unterschiedlichen Vulnerabilitäten der Länder der MENA-Region (Namdar et al., 2021) die künftig zu erwartenden Entwicklungen von Dürren und Sturzfluten und die damit verbundenen möglichen ökologischen und sozioökonomischen Folgen regionsspezifisch identifiziert werden müssen. Dies ist Voraussetzung, um Lösungsansätze und konkrete Transformationsbereiche wirksam gestalten und Grenzen der Beherrschbarkeit frühzeitig erkennen zu können.

4.4

Gletscherschmelze im Hindukusch-Karakorum-Himalaya: Verlust natürlicher Wasserspeicher



2 Mrd.

Menschen beziehen Wasser aus den Flussbecken der Region

200 Mio.

Menschen leiden bereits unter erhöhtem Wasserstress

20% bis 65%

Gletscherverlust je nach Klimaszenario

Die Kryosphäre erfüllt eine wichtige Pufferfunktion: Veränderungen in Abflussregimen bedingt durch den Klimawandel und atmosphärische Zirkulationsmuster konnten bisher insbesondere in warmen Trockenphasen durch das jährlich wiederkehrende Schmelzwasser aus den riesigen Wasserspeichern in Gletschern abgedeckt werden. Diese Pufferfunktion droht weltweit verloren zu gehen, mit weitreichenden Folgen für Ökosysteme und Menschen (Kap. 3.1.1.3, 3.1.1.4).

Neben den Polen sind die Gletscher der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirgskette (HKH-Gebirgskette) die größten gefrorenen Süßwasserspeicher der Erde, weshalb sie auch als „dritter Pol“ bezeichnet werden. Sie speisen zehn große Flussbecken, deren Flussläufe in acht Ländern entspringen (Afghanistan, Bangladesch, Bhutan, China, Indien, Myanmar, Nepal und Pakistan) und durch acht weitere Länder fließen. Die zehn Flussbecken versorgen fast zwei Mrd. Menschen mit Wasser, also ein Viertel der Weltbevölkerung (Abb. 4.4-1; Yao et al., 2022; Nie et al., 2021). Doch die „asiatischen Wassertürme“ (Asian Water Towers) sind unter den weltweit von Klimawandel und menschlicher (Über-)Nutzung am stärksten bedrohten gletscherbasierten Wassersystemen (Abb. 4.4-2; Immerzeel et al., 2020).

Die Folgen des Klimawandels, insbesondere das Abschmelzen der Gletscher und veränderte Niederschlagsmuster, aber auch auftauender Permafrost, verändern die Wasserverfügbarkeit und -qualität für Ökosysteme und Menschen in der HKH-Region, vor allem in den Hochlagen aber auch im Tiefland. Hinzu kommen ein höherer Nutzungsdruck und Wasserbedarf im Zuge von demografischem Wandel, sozioökonomischer Entwicklung und Infrastrukturentwicklung in der Nähe von Gletschern und Flussläufen (z. B. für Industrie oder Wasserkraft). Hydropolitische Konflikte und Governanceherausforderungen erschweren ein sozial ausgewogenes und nachhaltiges Wassermanagement. Dieses komplexe Wirkungsgefüge macht die Flussbecken in der HKH-Region besonders anfällig gegenüber Wasserstress. Besonders kritisch ist

die Lage im Indus-Becken, wo bereits mehr als 260 Mio. Menschen leben und bis 2050 ein Bevölkerungsanstieg um etwa 50 % erwartet wird (Abb. 4.4.2; Scott et al., 2019; Immerzeel et al., 2020).

4.4.1

Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen

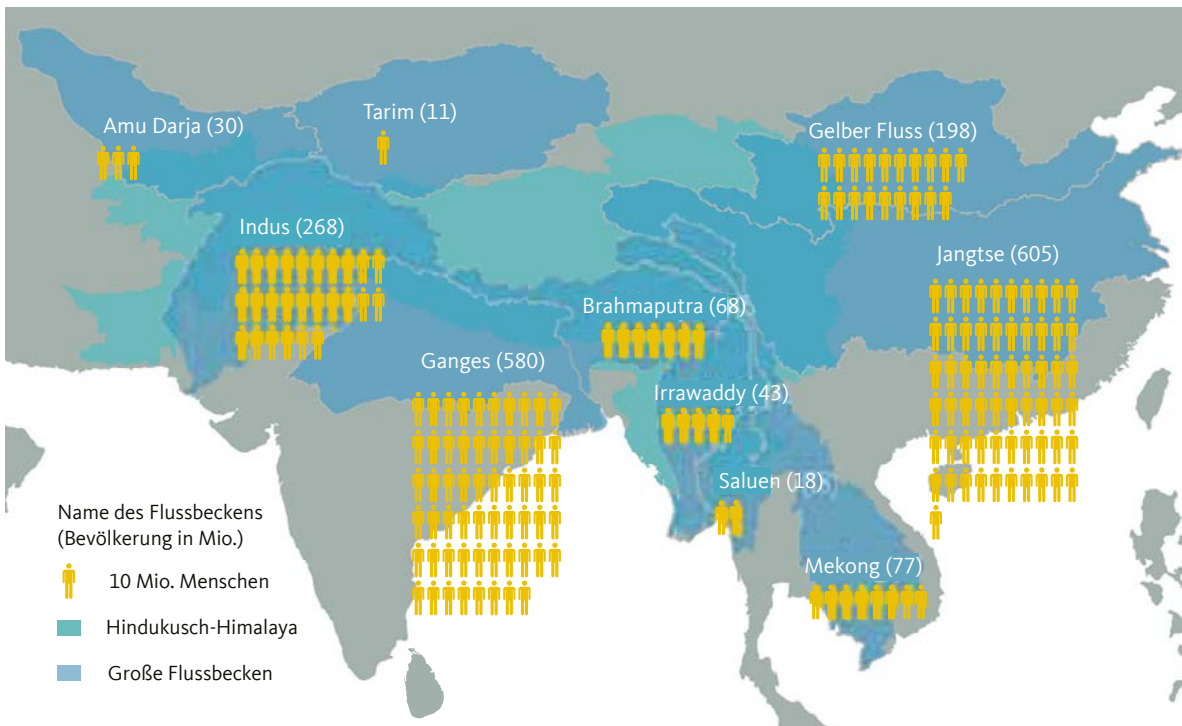
Im Folgenden werden die Ursachen für den Verlust der Gletscher und ihrer Pufferfunktion im Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirge skizziert. Es wird gezeigt, dass ein steigender Wasserbedarf die resultierende Wasserknappheit in einigen Regionen noch verstärken wird.

4.4.1.1

Klimawandelbedingter Rückgang der Gletscher und veränderte Abflussmengen

Wie Gletscher weltweit, verzeichnen auch die Gletscher der HKH-Gebirgskette durch den Klimawandel einen stetigen Rückgang, der in Zukunft weiter zunehmen wird (Hock et al., 2019; Yao et al., 2022): Bis 2100 wird auch ohne weitere Erwärmung ein Verlust von mehr als 20 % der Eismasse und vergletscherten Fläche in der HKH-Gebirgskette projiziert, je nach Szenario steigt dieser Anteil auf ein Drittel (RCP2.6), die Hälfte (RCP4.5) oder auf bis zu 65 % (RCP8.5; Yao et al., 2022; Jackson et al., 2023). Die Projektionen unterscheiden sich für die nördlichen und südlichen Becken der HKH-Region.

Die Vulnerabilität gegenüber den Folgen abschmelzender Gletscher und damit verbundenen Veränderungen der Abflussmengen hängt auch davon ab, zu welchem Anteil die Flussbecken von Gletscherschmelzwasser (im Vergleich zu Regenwasser) gespeist werden. Kryosphärische Komponenten wie Schmelzwasser und Permafrost spielen eine wichtige Rolle in der Stützung von Basisabflüssen, besonders in den späten Sommermonaten (Abb. 3.1-4; Kap. 3.1.1.3). In der Region sind besonders die Abflüsse des Indus-Beckens von Gletscherschmelzwasser abhängig, das im oberen Indus-Becken etwa 40 % des Gesamtabflusses beiträgt (Lutz et al., 2014; Azam et al., 2021). Dieser Anteil wird jedoch mit zunehmender Erwärmung abnehmen (Abb. 4.4-3; Lutz et al., 2014; Scott et al., 2019; Cui et al., 2023). Im oberen Lauf des Indus-Beckens wird „Peak Water“ – d. h. der Zeitpunkt des maximalen jährlichen Gesamtabflusses (Kap. 3.1.1.3) – bis 2045 (± 17 Jahre; RCP4.5) bzw. 2064 (± 19 Jahre; RCP 8.5) erreicht werden, in den meisten anderen Flussbecken der HKH-Region voraussichtlich bis Mitte des Jahrhunderts (Nie et al., 2021; Nepal et al., 2023). Problematisch ist, dass der Rückgang der Gesamtabflussmengen nach Erreichen von Peak Water im Indus- und Tarim-Becken nicht vollständig von steigenden Niederschlagsmengen ausgeglichen werden kann (Nie et al., 2021). Darüber

**Abbildung 4.4-1**

Die Flusseinzugsgebiete und Bevölkerung der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region. Die Abbildung zeigt die Anzahl der Menschen, die in den zehn Flussbecken der Region leben (Stand 2019). Am bevölkerungsreichsten sind das Jangtse-Becken (605 Mio. Menschen), das Ganges-Becken (580 Mio. Menschen) und das Indus-Becken (268 Mio. Menschen). Mit 11 Mio. Menschen ist das Tarim-Becken am wenigsten bevölkert.
 Quelle: Scott et al., 2019

hinaus trägt Schmelzwasser entscheidend zur Grundwasseranreicherung in den Hochlagen bei; im oberen Flusslauf des Indus-Beckens z. B. macht Schmelzwasser 83 % der jährlichen Grundwasseranreicherung aus (44 % aus Gletschern, 39 % aus Schnee; Lone et al., 2021). In den schmelzwassergespeisten Flussbecken der HKH-Region ist die Wasserversorgung von Menschen und Ökosystemen also besonders in wärmeren und trockenen Phasen (Juni–Oktober) bedroht, wenn die Schneedecke geschmolzen ist und Niederschlag nicht wesentlich zum Abfluss beiträgt. In eben solchen Phasen haben Gletscher bisher als wichtige Puffer für die Wasserversorgung fungiert (Abb. 3.1-4; Kraaijenbrink et al., 2021; Hock et al., 2019).

Nicht nur die Quantität, sondern auch die Qualität des verfügbaren Wassers ist betroffen: Das Abschmelzen der Gletscher sowie veränderte Dynamiken in Schneeschmelze, Niederschlag und Evaporation führen auch zu wechselnden Sediment- und Schadstoffbelastungen, z. B. mit POPs, PCBs, DDT, Arsen sowie Schwermetallen wie Quecksilber, mit erheblichen gesundheitlichen Folgen für Natur und Mensch (Hock et al., 2019; Nepal et al., 2023; Rasul und Molden, 2019).

Sich zurückziehende Gletscher wirken sich auch auf Biodiversität und Ökosysteme aus. Die HKH-Gebirgskette ist auch aufgrund ihrer topographischen und klimatischen Vielfalt eines der Gebirgssysteme mit der höchsten Biodiversität. Vier globale Biodiversitäts-Hotspots befinden sich ganz oder teilweise in dieser Region und erbringen eine Vielzahl von Ökosystemleistungen in den Flusseinzugsgebieten (Xu et al., 2019). Mit dem Abschmelzen der Gletscher verbundene Veränderungen in Wassermenge und Wasserqualität führen je nach Art und Region u. a. zu veränderten und neuen Habitaten, einer Verschiebung des Verbreitungsgebiets, Änderungen in Verhalten, Phänologie und Primärproduktion mit Auswirkungen auf Funktionsweisen und Ökosystemleistungen von Gletscher- und Gebirgsökosystemen und ihre Biodiversität (Kap. 3.3.1; Jacobsen et al., 2012; Cauvy-Fraunie und Dangles, 2019; Rasul und Molden, 2019). Verlierer sind vor allem Hochgebirgsarten und solche, die auf glaziale Bedingungen angewiesen sind (Spezialisten). Arten, die unter vielfältigen Umweltbedingungen leben können (Generalisten) und sich von flussabwärts kommend ansiedeln, zu den Gewinnern gehören werden, weil sie keine so spezialisierte Nische haben. Die HKH-Region weist

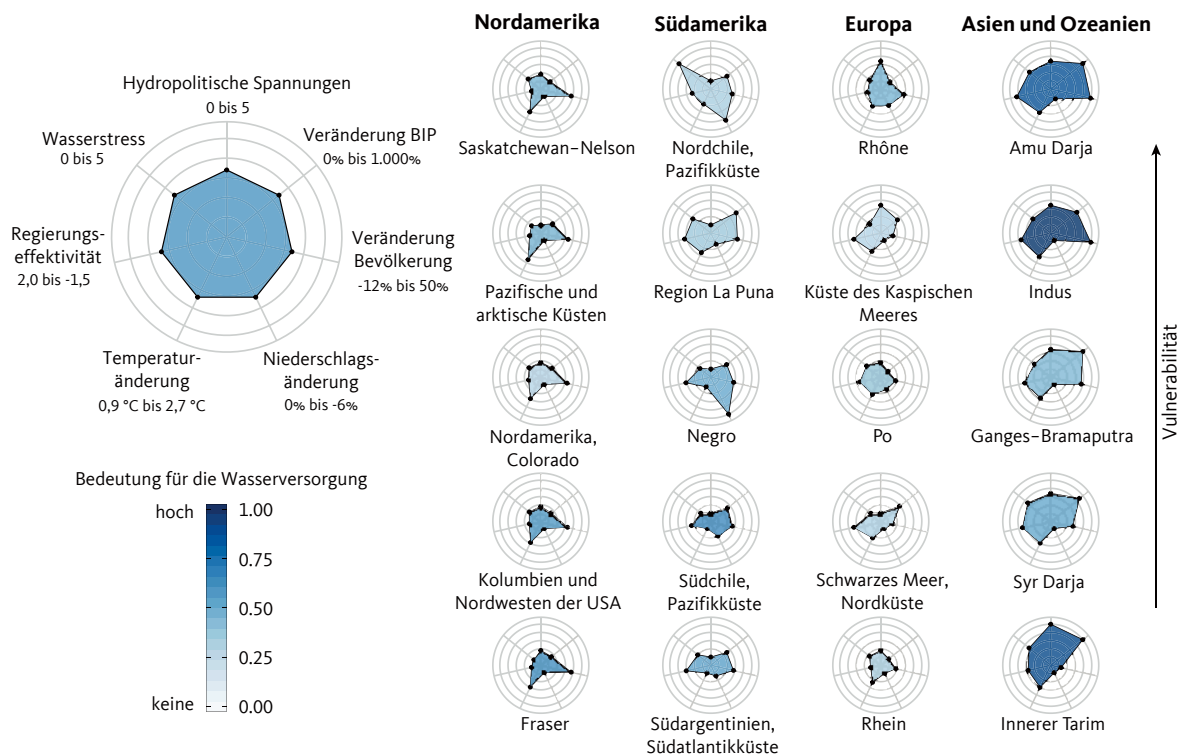


Abbildung 4.4-2

Vulnerabilität, Bedeutung für die Wasserversorgung und projizierte Veränderungen der wichtigsten kryosphärischen Wassertürme und zugehörigen Flussbecken jedes Kontinents. Je dunkler die Einfärbung der Polygone, desto größer die Bedeutung für die Wasserversorgung von Ökosystemen und Gesellschaft. Je größer das Polygon, desto höher die Vulnerabilität (abnehmend von oben nach unten), die anhand der Veränderung folgender Indikatoren bemessen wurde: Wasserstress und Effektivität der Regierung im Einzugsgebiet; hydropolitische Spannungen; prognostizierte Veränderungen des Bruttoinlandsprodukts, der Bevölkerung (gemäß SSP2) sowie des Niederschlags und der Temperatur zwischen 2000 und 2050 (gemäß CMIP5 RCP4.5). Es zeigt sich, dass die asiatischen Wassertürme und die mit ihnen verbundenen Flussbecken, und insbesondere das Indus-Becken, nicht nur besonders vulnerabel sondern auch von hoher Bedeutung für die Wasserversorgung von Menschen und Ökosystemen sind.

Quelle: verändert nach Immerzeel et al., 2020

einen hohen Anteil endemischer, d. h. nur hier vorkommender Arten auf (Xu et al., 2019), die insbesondere in den Biodiversitäts-Hotspots zu finden und von Veränderungen ihres Lebensraums bedroht sind, sowohl durch den Klimawandel als auch durch direkte menschliche Eingriffe wie Infrastrukturentwicklung, Urbanisierung oder Landwirtschaft. Für den indischen Himalaya wird bis 2100 der Verlust eines Viertels der endemischen Arten erwartet (Xu et al., 2019). Veränderungen in der Vegetation und ihrer Produktivität können wiederum den Zeitpunkt, die Qualität und Quantität der Wasserversorgung in der Region beeinflussen.

4.4.1.2

Verstärkung von Wasserknappheit durch steigenden Wasserbedarf und Infrastrukturprojekte

Dem verminderten zukünftigen Wasserdargebot nach Erreichen von Peak Water steht ein steigender Wasserbedarf für Landwirtschaft, Industrie und Haushalte in der gesamten Region gegenüber, der sich bereits abzeichnet. Er ist vor allem durch demografischen Wandel und sozioökonomische Entwicklung angetrieben (Abb. 4.4-4; Maharjan et al., 2023). Es zeigen sich teilweise große regionale Unterschiede: Eine Studie aus dem Jahr 2022 verzeichnet den höchsten derzeitigen Wasserbedarf der Region im Indus-Becken (~299 Gt pro Jahr, im Vergleich zu ~5,1 Gt pro Jahr im Saluen-Becken; Yao et al., 2022). Für die gesamte HKH-Region wird ein Anstieg des Wasserbedarfs um 11 % bis 2050 und um 18 % bis 2090 erwartet, jeweils im Vergleich zum Mittel 2006–2015, mit hoher regionaler Variabilität (Abb. 4.4-4; Yao et al., 2022).

Die Bewässerungslandwirtschaft trägt in einigen Teilen der HKH-Großregion erheblich zum steigenden Wasserbedarf bei, z. B. im Indus-Becken (Yao et al., 2022; Abb. 4.4-4). Ineffiziente Bewässerungstechniken und nicht nachhaltige Wassernutzungsstrategien verschärfen die Lage (Rasul und Molden, 2019). Darüber hinaus trägt eine Übernutzung des Grundwassers zu Wasserstress bei, insbesondere im Indus- und Ganges-Becken (Nie et al., 2021). Die Energieversorgung, insbesondere Wasserkraft, sowie Infrastrukturprojekte bzw. Bergbau, die ihrerseits von den kryosphärischen Veränderungen beeinträchtigt werden (Kap. 4.4.2), üben zunehmend Druck auf Ökosysteme aus. Wasserkraftwerke werden z. B. immer näher an die Gletscherseen gebaut, Bergbau destabilisiert Böden und führt zu Verschmutzung und wasserbezogene Infrastruktur greift in natürliche Flussläufe ein (Scott et al., 2019; Hock et al., 2019). Im Indus-Becken zogen diese Eingriffe teilweise einen verringerten Sedimenttransport in untere Flussläufe nach sich (Laghari et al., 2015).

Die Lage in der HKH-Region zum Ende des Jahrhunderts ist bedrohlich: Ein vermindertes Wasserdargebot trifft auf einen steigenden Wasserbedarf, was den bereits

jetzt zu beobachtenden Wasserstress in einigen Regionen nur noch erhöhen wird. Auf Dauer wird es nicht mehr möglich sein, den Anteil der asiatischen Wassertürme der HKH-Gebirgskette an der Wasserversorgung aufrechtzuerhalten (Immerzeel et al., 2020). Durch den Verlust der Pufferfunktion der Gletscher ist damit zu rechnen, dass sich der Wasserstress für Menschen und Ökosysteme in der Region zukünftig verstärkt. Dies könnte zu einer Destabilisierung der Region beitragen, sofern keine geeigneten und umfassenden Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden. In der HKH-Region werden bereits vielfältige, auch innovative Maßnahmen genutzt, um die Wasserversorgung zu gewährleisten, z. B. über Rationierung, die Konstruktion sogenannter Eisstupas bzw. künstlicher Gletscher oder die Installation von Wassertanks. Auch in einzelnen Sektoren wie der Landwirtschaft ist eine Anpassung zu beobachten (z. B. Diversifizierung des Saatguts, Veränderungen der Saatzeit; Maharjan et al., 2023). Noch ist allerdings unklar, inwieweit bereits genutzte Maßnahmen den mittel- bis langfristigen Veränderungen gerecht werden können – hier existiert Forschungsbedarf.

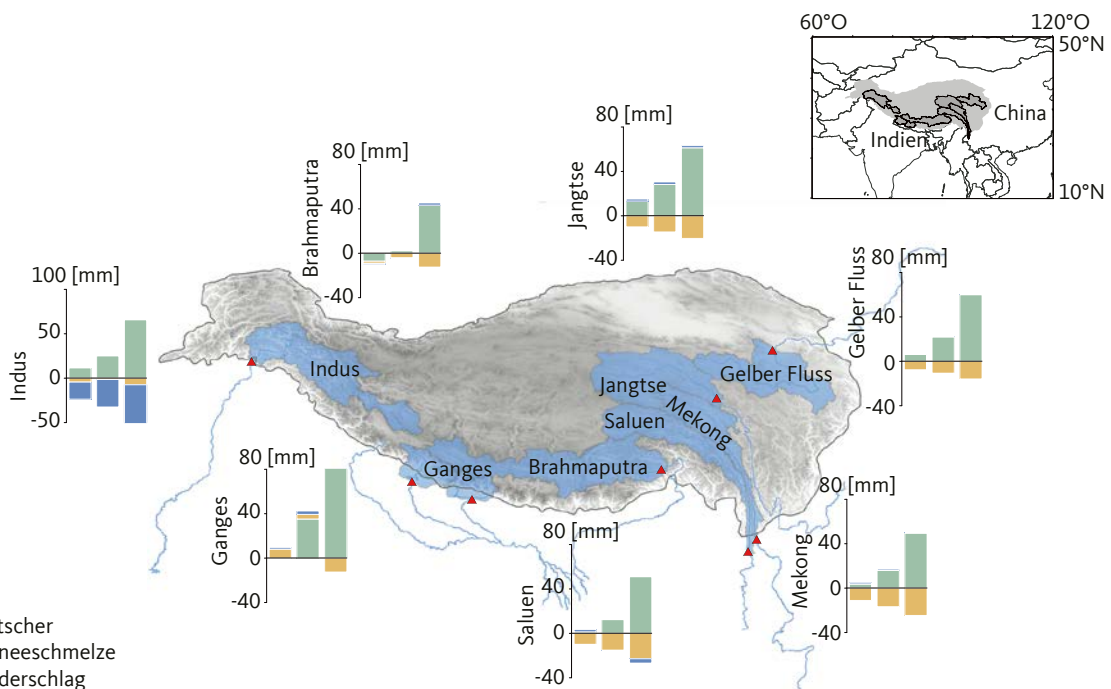


Abbildung 4.4-3

Relative Änderungen des mittleren Jahresabflusses in den Flussbecken der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region bei unterschiedlich starker Erwärmung. Die Balkendiagramme zeigen Veränderungen des Niederschlags (grün), der Schneeschmelze (gelb) und des Gletscherabflusses (blau) bei einer Erwärmung von 1,5 °C, 2,0 °C und 3,0 °C (linker, mittlerer und rechter Balken). Die Veränderungen unterscheiden sich zwischen den Flussbecken, wobei der Anteil des Niederschlags am Gesamtabfluss in den meisten Flussbecken zunimmt und die Anteile von Schnee- und Gletscherschmelzwassers abnehmen. Besonders ausgeprägt ist der Rückgang des Gletscherschmelzwassers im Indus-Becken.

Quelle: Cui et al., 2023

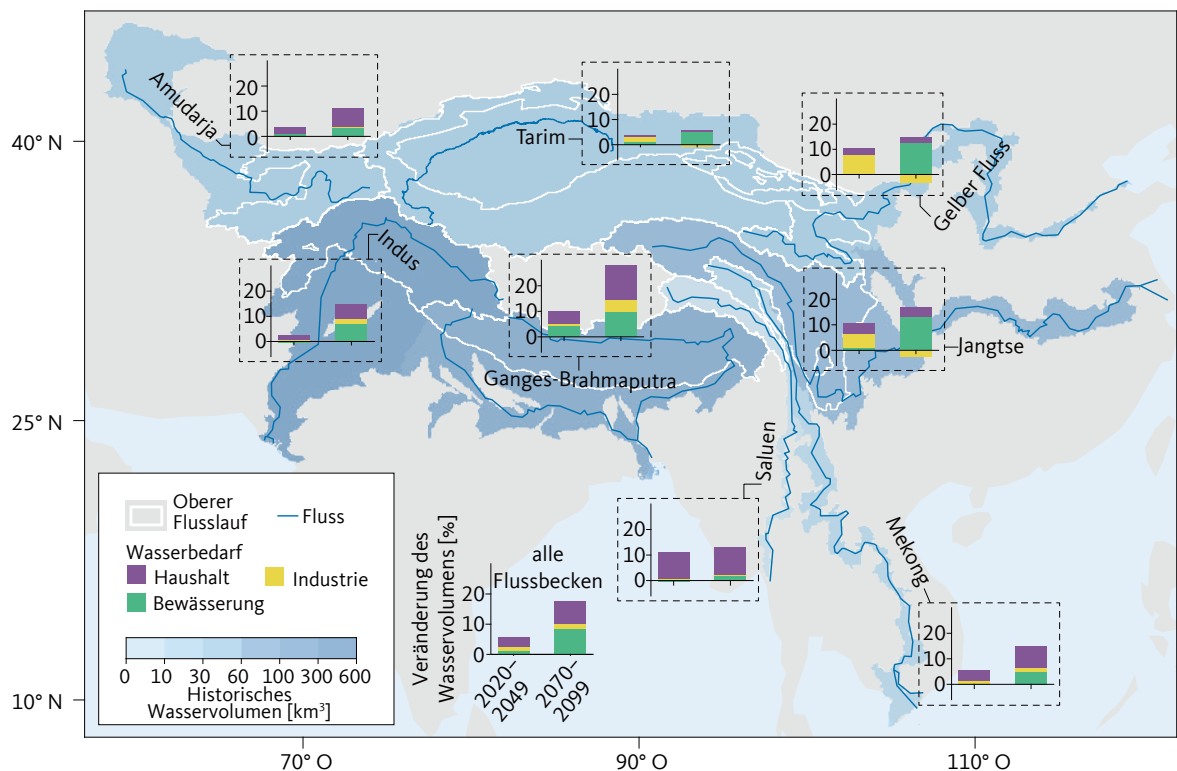


Abbildung 4.4-4

Zukünftige Veränderungen des menschlichen Wasserbedarfs in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region. Gezeigt sind prognostizierte Veränderungen des Wasserbedarfs in den nördlichen (hellblau) und südlichen (dunkelblau) Flussbecken der HKH-Region für die Jahre 2020–2049 und 2070–2099 im Vergleich zu 2006–2015. Die gestapelten Balken zeigen die relativen Veränderungen der Wasserentnahme für landwirtschaftliche (grün), häusliche (lila) und industrielle (gelb) Zwecke, die sich zwischen den Flussbecken der Region teilweise stark unterscheiden. Die Projektionen basieren auf Berechnungen mit dem globalen hydrologischen Modell H08 unter den Bedingungen des SSP2-RCP6.0 Szenarios.

Quelle: Yao et al., 2022

4.4.2

Destabilisierungspotenziale: Wasserknappheit, Naturgefahren und geopolitische Konflikte

Mit dem Verlust der Pufferfunktion der Gletscher, quantitativen und saisonalen Veränderungen der Abflussregime und erhöhten Naturgefahren infolge kryosphärischer Veränderungen gehen erhebliche Destabilisierungspotenziale einher. Bereits jetzt deuten sich Auswirkungen auf die Lebensweisen und die Ernährungssicherheit von Menschen sowohl in den Hochgebirgslagen als auch im Tiefland der HKH-Region an, die sich mit zunehmendem Klimawandel, erhöhtem Wasserbedarf und menschlicher Übernutzung sowie möglichen politischen Spannungen verstärken werden (Kap. 3). Im Folgenden werden drei wesentliche Destabilisierungspotenziale exemplarisch skizziert.

4.4.2.1

Zunehmende Wasserknappheit: Konsequenzen für die Ernährungs- und Energiesicherheit

Landwirtschaft, Haushalte, Industrie und Energiesektor in der HKH-Region sind auf eine ausreichende Wasserversorgung angewiesen, doch für einige Flussbecken zeichnet sich bereits jetzt erhöhter Wasserstress ab. Laut einem Bericht von China Water Risk sind bereits vier der acht Länder der HKH-Region von mittlerem bis schwerem Wasserstress betroffen: Afghanistan, China, Indien und Pakistan (Hu und Tan, 2018). Hinzu kommt, dass vier Länder (Afghanistan, Bangladesch, Myanmar und Nepal) in die Kategorie der am wenigsten entwickelten Länder fallen (UNCTAD, 2024) und multidimensionale Armut insbesondere in den bergigen Regionen der HKH-Gebirgskette weiterhin hoch ist (Gerlitz et al., 2015; Hunzai et al., 2011). Auch die Ernährungssicherheit bleibt ein zentrales Thema (Maharjan et al., 2023). Durch das Abschmelzen der Gletscher werden insbesondere in den zu

hohen Anteilen gletschergespeisten Flussbecken wie dem Indus-Becken – aus dem Afghanistan und Pakistan etwa ein Viertel ihrer Wasserressourcen beziehen – verstärkt Nutzungskonflikte zutage treten, die Risiken für die Ernährungs- und Energiesicherheit und damit auch die gesellschaftliche Entwicklung mit sich bringen.

Verminderte Abflüsse in den Sommermonaten aufgrund abschmelzender Gletscher können zu verminderten landwirtschaftlichen Erträgen und geringerer Produktivität führen, mit verheerenden Folgen für die Ernährungssicherheit. Schmelzwasser ist besonders in den Hochlagen essenziell für die landwirtschaftliche Bewässerung und Bodenfeuchte, aber auch im Tiefland sind die Auswirkungen zu spüren. Besonders betroffen ist das Indus-Becken, wo mehr als 90 % der Nutzpflanzen bewässert werden und die Bewässerung außerhalb der Monsunaison bis zu 60 % von Schmelzwasser abhängt (Molden et al., 2022; Biemans et al., 2019). In Ladakh, Indien, ist die Bewässerung sogar vollständig von Schmelzwasser abhängig (Nepal et al., 2023). Auch von der Viehzucht abhängige Lebensunterhalte sind bedroht, z. B. aufgrund von Veränderungen der Weidelandschaften (Maharjan et al., 2023). Der Lebensunterhalt von 129 Mio. Bäuer:innen in den Flussbecken des Ganges und Indus ist an Schmelzwasser gebunden (Biemans et al., 2019). Auch für die Trinkwasserversorgung in vielen Hochlagen der HKH-Region spielt Schmelzwasser eine wichtige Rolle (Molden et al., 2022). Die Auswirkungen werden auch über die Grenzen der Region hinweg zu spüren sein, die als wichtige Kornkammer für Asien fungiert und auch in der globalen Lebensmittelproduktion zentral ist: Die acht Länder der HKH-Region sind für 60 % der globalen Reisproduktion verantwortlich (Abb. 4.4-5), ein sehr wasserintensives Getreide, was zugleich wichtiges Grundnahrungsmittel ist (Hu und Tan, 2018).

Auch der Energiesektor wird von den Veränderungen in der Kryosphäre betroffen sein. Wasserkraft spielt eine zentrale Rolle für die Elektrizitätsversorgung in der Region: In Bhutan werden fast 100 % und in Nepal fast 93 % der Stromversorgung von Wasserkraft gedeckt (Rasul und Molden, 2019). Wasserkraft ist direkt von Veränderungen in den Abflussregimen (Saisonalität, Abflussmenge, Sedimentbelastung) im Zuge abschmelzender Gletscher betroffen (Hock et al., 2019; Nepal et al., 2023) und nimmt gleichzeitig selbst Einfluss auf die Wasserregime in Hoch- und Tiefland, etwa durch Flussumleitungen, große Bauprojekte, Wasserspeicherung und Verdunstung (Kasten 7.4-1, 7.4-2), mit Folgen für Menschen und Ökosysteme (Scott et al., 2019; Pandit und Grumbine, 2012). Die Bedeutung von Wasserkraft in der Region wird weiter zunehmen: Die installierte Wasserkraftkapazität in der HKH-Region macht bereits jetzt ein Drittel der weltweit installierten Kapazität aus, und in allen Ländern der Region gibt es Initiativen, die Produktionskapazität weiter zu erhöhen (Harlan und Hennig, 2022; Hu und Tan, 2018).

Das Abschmelzen der Gletscher der HKH-Gebirgskette wird also mit großer Wahrscheinlichkeit die Wasserverfügbarkeit für jene Länder und lokalen Gemeinschaften langfristig verringern, die bereits jetzt von mittlerem bis schwerem Wasserstress betroffen sind. Mögliche Folgen sind Konflikte, (Binnen-)Migration und Hunger (Molden et al., 2022). Die Landwirtschaft und der Energiesektor sind sowohl Betroffene dieser Wassernotlage als auch Treiber des erhöhten Nutzungsdrucks auf Gletscher, Flussbecken und Ökosysteme. Hinzu kommt eine zunehmende Urbanisierung, was den Druck auf die verfügbaren Wasserressourcen ebenfalls erhöht und weitere Herausforderungen im Wassermanagement mit sich bringt (Rasul und Molden, 2019; Kap. 4.2). Die

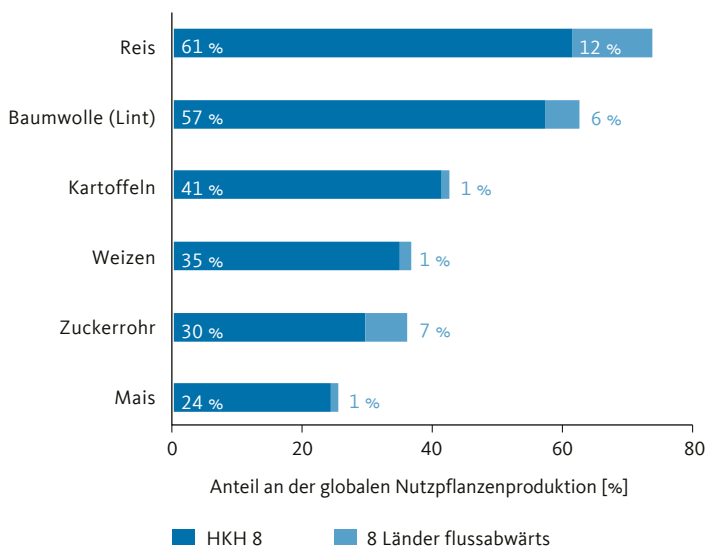


Abbildung 4.4-5

Anteil in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Großregion produzierter Lebensmittel an der globalen Lebensmittelproduktion. Die acht Länder der HKH-Region, in denen die Flußläufe entspringen (HKH 8: Afghanistan, Bangladesch, Bhutan, China, Indien, Myanmar, Nepal, Pakistan) tragen z. B. zu 61 % der globalen Reis-, 41 % der globalen Kartoffel- und 24 % der globalen Maisproduktion bei. Die Flüsse fließen durch acht weitere Länder (flussabwärts: Kambodscha, Kirgisistan, Laos, Tadschikistan, Thailand, Turkmenistan, Usbekistan, Vietnam).

Quelle: Hu und Tan, 2018

Veränderungen der Lebensräume, insbesondere in den Hochgebirgslagen, führen dazu, dass traditionelles und lokales Erfahrungswissen nicht mehr anwendbar ist, und gefährden traditionelle landwirtschaftliche Praktiken der Hochlandgemeinschaften, die einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert einnehmen (Hock et al., 2019; Namgay et al., 2014; Molden et al., 2022).

4.4.2.2

Zunehmende Naturgefahren: Bedrohung für Menschenleben und Infrastruktur

Naturgefahren infolge der abschmelzenden Gletscher in Kombination mit vermehrten Extremereignissen bedrohen zunehmend menschliche Siedlungen und Infrastruktur. Veränderungen im Permafrost können diese Risiken verstärken, sind aber noch nicht ausreichend erforscht (Rasul und Molden, 2019; Maharjan et al., 2023). Zu den Naturgefahren, die mit Veränderungen in der Kryosphäre in Verbindung stehen, gehören z. B. Gletscherseeausbrüche, Gletscherabbrüche, Eis- und Schneelawinen oder Erdrutsche. Nicht nur wird die Häufigkeit solcher Gefahren in Zukunft möglicherweise zunehmen, sondern auch die Vulnerabilität gegenüber diesen Gefahren steigt, und immer häufiger entwickeln sich einzelne Ereignisse zu Gefahrenkaskaden (Rusk et al., 2022; Nepal et al., 2023). Gletscherseeausbrüche gehören zu den schwerwiegendsten Naturgefahren, und Menschen in der HKH-Region sind besonders vulnerabel: Fast 1 Mio. Menschen leben in einer Distanz von weniger als 10 km zu Gletscherseen (Taylor et al., 2023; Zhang et al., 2024). Gletscherseeausbrüche sind nicht nur eine direkte Bedrohung für menschliches Leben, sondern können auch verheerende Folgen für Landwirtschaft, (Energie-)Infrastruktur, Bergbau und Tourismus haben (Zhang et al., 2023; Nie et al., 2023). Aufgrund der kryosphärischen Veränderungen in der Region können Gebiete in den Bergen erschlossen werden, die zuvor für Menschen unerreichbar waren. Dies wird die Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren weiter erhöhen, besonders wenn kein adäquates Risikomanagement bzw. keine Frühwarnsysteme existieren. Die zunehmende Degradation der Permafrostböden verstärkt diese Gefahren und kann zu einer weiteren Destabilisierung der Hanglagen führen und Erdrutsche begünstigen (Bolch et al., 2019; ICIMOD, 2023). Auch steigende Sedimentbelastungen in Flüssen infolge abschmelzender Gletscher sind als langsam einsetzende Naturgefahren (slow-onset hazards) eine Bedrohung für Mensch und Ökosysteme. Zu den möglichen mittel- bis langfristigen Folgen zählen u. a. Beeinträchtigungen von Wasserkraftwerken und ihrer Wasserspeicherfunktion (z. B. durch Sedimentbeladung der Reservoirs) oder ein Rückgang in der Wasserqualität, mit Folgen für aquatische Ökosysteme und die menschliche Gesundheit, denn Sedimentpartikel sind Vektoren

für den Transport von Schwermetallen und anderen schädlichen Stoffen (Zhang et al., 2022; Herman et al., 2021; Nepal et al., 2023).

4.4.2.3

Gesellschaftliche und geopolitische Konflikte

Die projizierten Veränderungen in der Kryosphäre können zu erheblichen Nutzungskonflikten führen, sowohl auf nationaler Ebene als auch über die Landesgrenzen hinweg. Innerhalb der Region ist teilweise eine hohe Abhängigkeit von erneuerbaren Wasserressourcen zu beobachten, die außerhalb der eigenen Landesgrenzen entspringen (Abhängigkeiten zwischen Ober- und Unterlauf; Maharjan et al., 2023). Für Bangladesch und Pakistan betrifft dies beispielsweise 91 % bzw. 78 % der Wasserressourcen, während es für China nur etwa 1 % sind (Hu und Tan, 2018). Dadurch entstehen ungleiche Macht- und Abhängigkeitsgefüge. Bereits jetzt sind grenzüberschreitende Wasserkonflikte in der Region – insbesondere im Indus-Becken und im Ganges-Brahmaputra-Becken – zu beobachten, die aufgrund regionaler und saisonaler Verschiebungen in der Wasserverfügbarkeit sowie steigendem Wasserstress in der Region möglicherweise noch zunehmen (Maharjan et al., 2023).

Diese Abhängigkeiten machen das Wassermanagement kompliziert. Im Indus-Becken könnten z. B. veränderte Abflussmengen und zunehmende Nutzungskonflikte bereits etablierte Verträge zur Wasserverteilung zwischen Ländern und subnationalen Einheiten beeinträchtigen, wie etwa den bisher erfolgreichen Indus-Wasservertrag (Maharjan et al., 2023). Erst 2023 hat Pakistan die Auslegung des Vertrags zum Thema Wasserkraft durch Indien vor den Ständigen Schiedshof in den Haag gebracht (PCA, 2023). Um wasserbezogenen Konflikten vorzubeugen, müssen Lösungsansätze entwickelt werden, die in Anbetracht verringerter Verfügbarkeiten eine gerechte Verteilung des Wassers ermöglichen, auch über Landesgrenzen hinaus.

4.4.3

Zentrale Herausforderungen

Aus dieser regionalen Wassernotlage mit planetarer Dimension ergeben sich zentrale Herausforderungen, deren Bewältigung Lösungen auf lokaler, regionaler und globaler Ebene erfordert:

1. Die Veränderungen der saisonalen und regionalen Wasserverfügbarkeit und der Verlust der natürlichen Wasserspeicher der Gletscher haben weitreichende Folgen für Ökosysteme und Menschen. Dies betrifft u. a. die Veränderung von Lebensräumen und traditionellen Lebensformen, die Ernährungssicherheit, Armutsbekämpfung, Energieversorgung sowie die

gesellschaftliche und politische Stabilität. Noch mangelt es an Lösungsansätzen für den Umgang mit diesen Folgen. Es besteht eine hohe Planungsunsicherheit.

2. Ein zunehmender Wasserbedarf von Haushalten, Industrie und Landwirtschaft sowie eine ineffiziente Wassernutzung verschärfen den Nutzungsdruck.
3. Es bestehen große Lücken in Daten und Monitoring. Dies betrifft u. a. die zukünftige Wasserverfügbarkeit und den Wasserbedarf (insbesondere auch Ober-Unterlauf-Verknüpfungen), Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität sowie die Wirksamkeit unterschiedlicher Mechanismen zur Anpassung an Naturgefahren (technisch, naturbasiert, institutionell). Veränderungen im Permafrost, die die beobachteten Risiken teilweise noch verstärken können, sind noch wenig erforscht und quantifiziert. Auch ist noch nicht quantifiziert, was die kryosphärischen Veränderungen für den Lebensunterhalt der lokalen Bevölkerung insbesondere in den Hochlagen bedeutet, die zu einem großen Teil von der Natur abhängig sind.
4. Fehlende oder unzureichende Katastrophenvorsorge bzw. Frühwarnsysteme und eine hohe gesellschaftliche Vulnerabilität erhöhen das Risiko von Naturgefahren für die Gesellschaft.
5. Zwischen Stakeholdern und Ländern in der Region ist trotz steigender wasserbezogener Spannungen und Konflikte eine mangelnde Kooperation zu beobachten.

Abschmelzende Gletscher bergen auch in anderen Regionen der Welt wasserbezogene Gefahren; besonders betroffen sind z. B. die südlichen Anden, Westkanada und die westlichen USA – insbesondere Alaska – oder die Alpen (Hugonnet et al., 2021; Hock et al., 2019).

4.5

Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika



2,7 Mrd.

Menschen sind heute von organischer Wasserverschmutzung betroffen

auf 4,2 Mrd.

könnte ihre Zahl bis 2100 ansteigen

38 %

der von organischer Wasserverschmutzung betroffenen Weltbevölkerung wird 2100 in Subsahara-Afrika leben

Seit dem 19. Jahrhundert gingen das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sowie die Urbanisierung in den Hoheinkommensländern mit einer Zunahme der Schadstoffemissionen in Oberflächengewässer einher. Durch den Aufbau kosten- und ressourcenintensiver Infrastruktur zur mechanischen und biologischen

Abwasserbehandlung, gepaart mit der Ausnutzung der Verdünnungseffekte der Oberflächengewässer, ist die Belastung durch organische Kohlenstoffverbindungen und Nährstoffe aus häuslichem Abwasser in den Hoheinkommensländern gesunken. Persistente organische Verbindungen aus Industrie, Haushalt und Landwirtschaft sind jedoch weiterhin eine Herausforderung für die Abwasserbehandlung in Hoheinkommensländern (WBGU, 2023: 191 ff.; Kap. 7).

In Ländern niedrigen und mittleren Einkommens führen Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sowie Urbanisierung aktuell zu einer Zunahme der Einleitung ungeklärter oder unzureichend behandelter Abwässer sowie einer erhöhten Wasserentnahme. Dieser Prozess wird durch die Auswirkungen des Klimawandels verschärft. In der Folge zeichnen sich in Teilen Lateinamerikas, Ost-, Süd- und Südasiens und der MENA-Region sowie insbesondere in Subsahara-Afrika bis Ende des Jahrhunderts Schwerpunkte der Verschmutzung von Oberflächengewässern ab, die die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen bedrohen. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf Subsahara-Afrika, weil hier sowohl relativ als auch absolut der größte Anstieg der betroffenen Bevölkerung prognostiziert wird, unabhängig von sozioökonomischen Entwicklungspfaden und Emissionsszenarien (Jones et al., 2023). Hauptursache der Wasserverschmutzung ist die Belastung mit häuslichem Abwasser und Abwässern aus der Nutztierhaltung (Wen et al., 2017), die organische Kohlenstoffverbindungen wie Kohlenhydrate, Fette und Proteine, Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor sowie pathogene Mikroorganismen enthalten.

4.5.1

Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen

Aktuellen globalen Projektionen zufolge werden die Verschmutzung von Oberflächengewässern und die Anzahl der davon betroffenen Menschen in diesem Jahrhundert deutlich ansteigen. Bis 2050 werden voraussichtlich 2,5 Mrd. Menschen von Wasserverschmutzung durch organische Kohlenstoffverbindungen betroffen sein (Wen et al., 2017) und bis zu 4,5 Mrd. Menschen von der Belastung des Wassers durch Stickstoff (Chaplin-Kramer et al., 2019).

Die Vergleichbarkeit der Projektionsstudien zur globalen Verschmutzung von Oberflächengewässern wird dadurch eingeschränkt, dass in den Studien verschiedene Wasserqualitätsparameter (Stickstoff, gelöste Feststoffe usw.) und verschiedene Zukunftsszenarien und Zeithorizonte betrachtet werden. Aus diesem Grund wird hier die Projektionsstudie von Jones et al. (2023) in den Fokus genommen, in der Szenarien für drei Arten der Verschmutzung von Oberflächengewässern anhand dreier

Szenarien (SSP-RCPs) bis 2100 entwickelt wurden. Der Zeithorizont sowie der Vergleich der Entwicklungspfade und der Arten der Verschmutzung sind in der Studie von Jones et al. (2023) bisher einzigartig. Für robuste Prognosen der globalen Verschmutzung von Oberflächengewässern muss diese Studie dennoch durch weitere Projektionsstudien ergänzt werden, die verschiedene Eintragsquellen, Verdünnungseffekte und Abbauprozesse umfangreich berücksichtigen (Kap. 4.7).

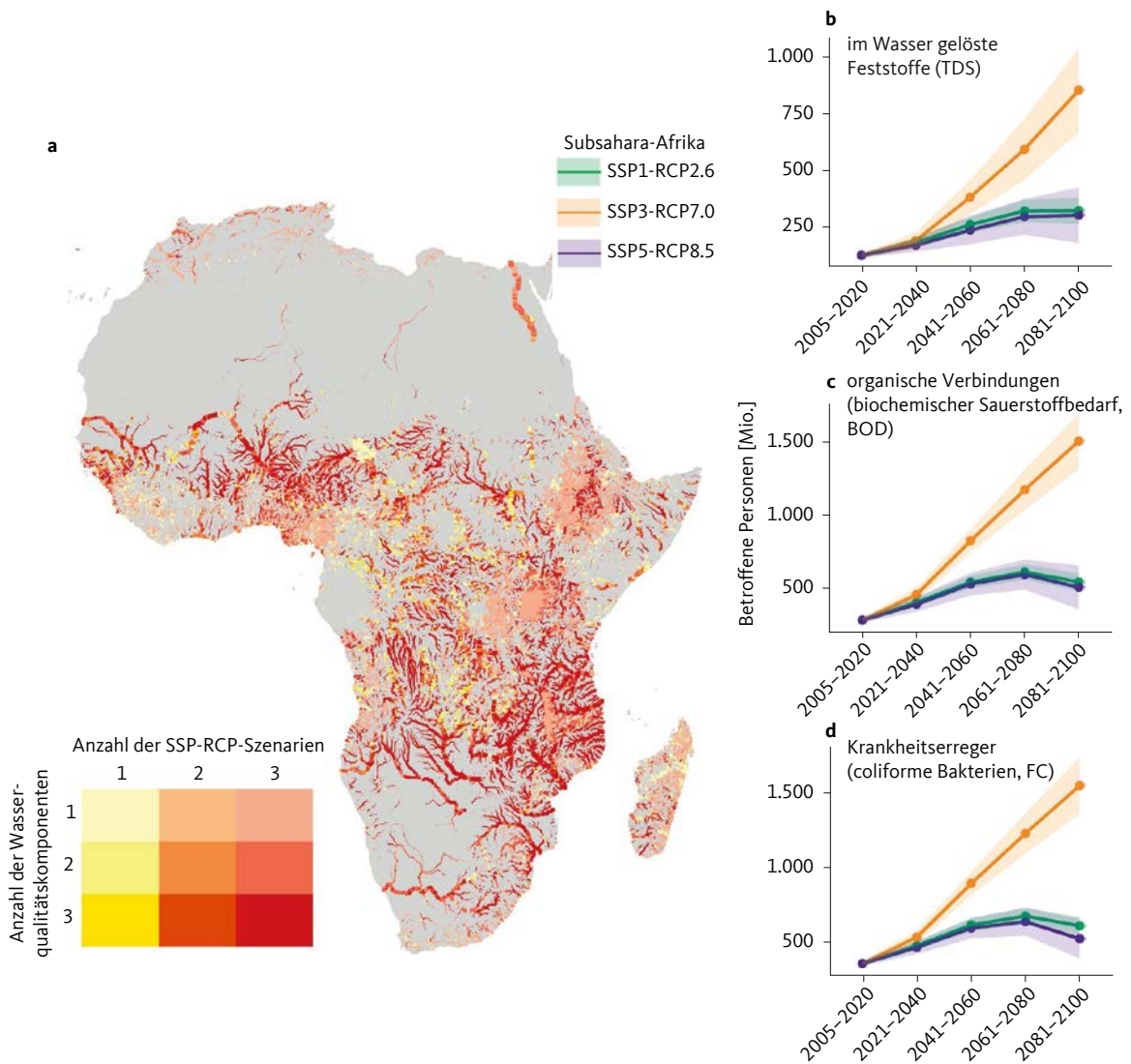
Für das Szenario SSP1-RCP2.6 „Nachhaltigkeit“, das für eine nachhaltige, kooperative Entwicklung innerhalb der planetaren Leitplanken steht, wird bis 2100 eine Abnahme der Anzahl der Menschen, die von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffen sind, von 2,7 Mrd. auf 1,5 Mrd. prognostiziert (Jones et al., 2023). Für das Szenario SSP5-RCP8.5 „fossil befeuerte Entwicklung“, das durch starkes Wirtschaftswachstum, ausgiebige Nutzung fossiler Energiequellen sowie ressourcen- und energieintensive Lebensstile gekennzeichnet ist, wird ebenfalls eine Abnahme auf 1,6 Mrd. Menschen vorhergesagt. Die Autor:innen der Studie erklären dies durch ein starkes Wachstum der globalen Wirtschaft, das zu einer schnellen Verbreitung von Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung führt (Jones et al., 2023). Jedoch werden in diesem Entwicklungspfad das drastische Ausmaß des Klimawandel sowie die Auswirkungen auf die Ökosysteme und die menschliche Bevölkerung dominieren. Für das Szenario SSP3-RCP7.0 „regionale Rivalität“, das für mangelnde internationale Kooperation, schwaches Wirtschaftswachstum, einen Rückgang von Investitionen in Forschung und Bildung sowie massive Umweltschäden steht, werden sogar bis zu 4,2 Mrd. Menschen prognostiziert, die Ende des Jahrhunderts von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffen sind (Jones et al., 2023). Für die Belastung von Oberflächengewässern durch pathogene Mikroorganismen, die aus mit Fäkalien belasteten Abwässern aus Haushalten oder der Nutztierhaltung stammen und eine direkte Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen, sowie durch im Wasser gelöste Feststoffe (vor allem Salze, die aus der bewässerten Landwirtschaft, der Industrie und zu einem geringeren Teil aus häuslichen Abwässern stammen) prognostizieren Jones et al. (2023) ähnliche Muster.

Diese globalen Projektionen verschleiern jedoch deutliche regionale Unterschiede. In den meisten Ländern mittleren und hohen Einkommens wird unabhängig vom Zukunftsszenario eine Verbesserung der Wasserqualität aufgrund von geringeren Schadstoffeinträgen durch verbesserte Abwasserbehandlung prognostiziert (Jones et al., 2023). In Ländern niedrigen Einkommens ist jedoch das Gegenteil der Fall, wobei sich unabhängig vom Zukunftsszenario die Schwerpunkte der globalen Verschmutzung von Oberflächengewässern von heute stark betroffenen

Regionen in Ost- und Südasien nach Afrika und insbesondere Subsahara-Afrika verschieben werden (Jones et al., 2023; Wang et al., 2019; Wen et al., 2017). Für viele Gebiete in Subsahara-Afrika wird unabhängig vom gewählten Zukunftsszenario ein substanzieller Anstieg der Verschmutzung von Oberflächengewässern durch organische Verbindungen, Pathogene sowie im Wasser gelöste Feststoffe vorhergesagt, der dazu führt, dass mehrere Grenzwerte zugleich überschritten werden (BSB: 8 mg pro l, TDS: 2.100 mg pro l, FC: 1.000 CFU pro 100 ml; Jones et al., 2023; Abb. 4.5-1). In der Folge wird bis Ende des Jahrhunderts der Anteil der Bevölkerung in Subsahara-Afrika substanziell ansteigen, der verschmutztem Wasser (mit organischen Verbindungen, Krankheitserregern sowie im Wasser gelösten Feststoffen) ausgesetzt ist. Insbesondere für das Szenario SSP3-RCP7.0 wird von Jones et al. (2023) ein starker Anstieg projiziert (im Wasser gelöste Feststoffe: etwa 800 Mio. Menschen, organische Verbindungen und Krankheitserreger: 1,5 Mrd. Menschen). Der Anstieg der betroffenen Bevölkerung entspricht verglichen mit heute einem Faktor von zwei bis sechs. Aktuell leben in Subsahara-Afrika 14 % der globalen Bevölkerung und 10 % der Bevölkerung, die von Wasserverschmutzung betroffen ist. Diese Anteile werden sich voraussichtlich bis Ende des Jahrhunderts auf bis zu 25 % und 38 % erhöhen und die Region damit überproportional von Wasserverschmutzung betroffen sein (Abb. 4.5-2; Jones et al., 2023).

Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und entsprechend erhöhte Wasserentnahme und Schadstoffeinträge in Oberflächengewässer konzentrieren sich insbesondere in den schnell wachsenden urbanen Zentren Subsahara-Afrikas wie Kinshasa, Nairobi und Addis Abeba. Daher werden die Abnahme der Wasserqualität und der substanzielle Anstieg der Anzahl betroffener Menschen hier deutlich verstärkt auftreten (Jones et al., 2023). Dies ist besonders problematisch im Zusammenhang mit den zahlreichen weiteren Problemen der Wasserversorgung, mit denen urbane Gebiete konfrontiert sind (Kap. 4.2).

Neben der Wasserverschmutzung durch Pathogene, organische Kohlenstoffverbindungen und im Wasser gelöste Feststoffe spielt die Verschmutzung von Oberflächengewässern mit Nährstoffen (Stickstoff und Phosphor) weltweit eine große Rolle. Diese sind in häuslichem Abwasser und dem Abwasser aus der Nutztierhaltung enthalten; der überwiegende Teil stammt allerdings aus Düngemitteln der konventionellen Landwirtschaft (Kap. 2.3.3.2). Für das Jahr 2050 wird für die Szenarien SSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0 und SSP5-RCP8.5 prognostiziert, dass weltweit jeweils 1,6 Mrd., 4,5 Mrd. und 1,5 Mrd. Menschen von der Belastung von Oberflächengewässern durch Stickstoff betroffen sein werden (Chaplin-Kramer et al., 2019). Die Autor:innen der Studie führen diesen Anstieg auf verringerte Ökosystemleistungen zur Bewahrung der

**Abbildung 4.5-1**

Zukünftige Verschmutzung von Oberflächengewässern in Subsahara-Afrika und Anzahl der betroffenen Menschen. Für weite Teile Subsahara-Afrikas wird bis Ende des Jahrhunderts eine substantielle Zunahme der Verschmutzung durch im Wasser gelöste Feststoffe (TDS), organische Verbindungen (biochemischer Sauerstoffbedarf, BSB/BOD) und Krankheitserreger (coliforme Bakterien, FC) vorhergesagt, unabhängig vom ausgewählten Zukunftsszenario (SSP-RCP).

Quelle: Jones et al., 2023

Wasserqualität durch den fortschreitenden Klimawandel zurück (Chaplin-Kramer et al., 2019). Im Vergleich zu anderen Regionen ist die Nutzung von Stickstoff- und Phosphatdünger in Subsahara-Afrika zwar aktuell niedrig (FAO, 2018: 23), verzeichnete aber zwischen 2015 und 2020 unter allen Weltregionen die größte jährliche Wachstumsrate bei der Nutzung von Stickstoffdünger (4,8%; FAO, 2018: 57 ff.). Auch bei Phosphatdünger

wurde im gleichen Zeitraum eine Wachstumsrate von 3,6% verzeichnet, die nur in Lateinamerika und der Karibik (4%) und West- und Südasien (4,4%) höher war (FAO, 2018: 57 ff.). Dies deckt sich mit der Studie von Chaplin-Kramer et al. (2019), die unter dem Szenario SSP3-RCP7.0 prognostiziert, dass bis 2050 fast 1,2 Mrd. Menschen in Afrika von der Belastung von Oberflächengewässern durch Stickstoff betroffen sein werden.

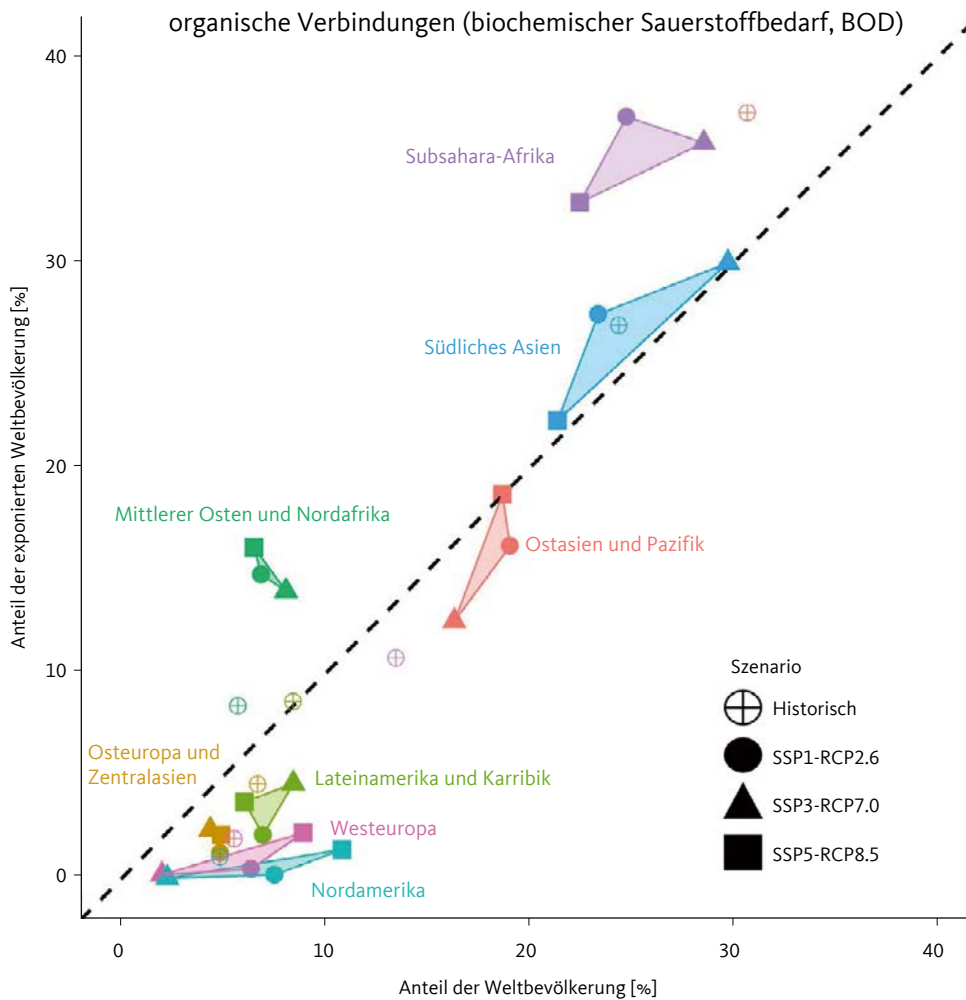


Abbildung 4.5-2

Anteil der Bevölkerung verschiedener Weltregionen, der Ende des Jahrhunderts von Wasserverschmutzung betroffen sein wird. Unabhängig vom Zukunftsszenario (SSP-RCP) wird erwartet, dass Subsahara-Afrika im Vergleich zu anderen Weltregionen überproportional von Wasserverschmutzung betroffen sein wird (hier exemplarisch für Verschmutzung mit organischen Kohlenstoffverbindungen, ausgedrückt als BSB/BOD). Die Ergebnisse werden für mehrjährige Zeitabschnitte einer historischen Referenzperiode (2005–2020) und den Zeitraum 2081–2100 unter Berücksichtigung dreier Zukunftsszenarien dargestellt. Quelle: Jones et al., 2023

4.5.2

Folgen der Wasserverschmutzung für Mensch und Natur

Wasserverschmutzung, insbesondere die Belastung mit Pathogenen, stellt eine direkte Gefahr für die menschliche Gesundheit dar, beispielsweise durch Durchfallerkrankungen oder Parasiteninfektionen (Kap. 2.3.3, 3.1.4, 3.3.2). Zudem stehen Unterernährung und kognitive Unterentwicklung in Zusammenhang mit mangelhaften Verhältnissen in der Wasser-, Sanitär- und Hygieneversorgung (Sinharoy et al., 2019). Die negativen Auswirkungen unzureichender Abwasserbehandlung auf Gesundheit und kognitive Entwicklung führen durch höheren Krankenstand und niedrigere Produktivität

auch zu wirtschaftlichen Verlusten. Diese lagen für Subsahara-Afrika im Jahr 2012 mit 3,2 % des BIP deutlich über allen anderen Weltregionen (WHO, 2020: 26 f.). Eine aktuelle modellbasierte Studie prognostiziert für die meisten Staaten Subsahara-Afrikas, dass eine positive wirtschaftliche Entwicklung dazu beitragen wird, die erhöhte Sterblichkeit und die wirtschaftlichen Verluste, die mit unzureichenden Verhältnissen in der Wasser-, Sanitär- und Hygieneversorgung (WASH) zusammenhängen, bis 2050 abzuschwächen, diese jedoch nicht gänzlich verhindern kann (Fuente et al., 2020). Entsprechend werden mit WASH verknüpfte Investitionen weiterhin ein anhaltendes Engagement internationaler Geldgeber und nationaler Regierungen erfordern (Fuente et al., 2020).

Die Verschmutzung von Oberflächengewässern wirkt nicht nur auf den Menschen selbst zurück, sondern schädigt auch massiv aquatische Ökosysteme. Biologisch abbaubare organische Kohlenstoffverbindungen aus häuslichen Abwässern sowie aus Tierhaltung und Landwirtschaft fördern in Oberflächengewässern mikrobielles Wachstum und Sauerstoffverbrauch (Wen et al., 2017), die zu Fischsterben führen können (van Vliet et al., 2023). Auf mikrobieller Ebene verändert der Eintrag unzureichend behandelter Siedlungsabwässer die Mikrobengemeinschaft und reduziert die mikrobielle Diversität in Flüssen (Xie et al., 2022). Die in Siedlungsabwässern und Abwässern aus Landwirtschaft und Tierhaltung enthaltenen Nährstoffe Stickstoff und Phosphor führen in Oberflächengewässern zu Eutrophierung und Algenblüte sowie zum Verlust von Habitaten und Biodiversität (Kap. 3.1.4.2).

Neben dem Eintrag von Nährstoffen, organischen Kohlenstoffverbindungen und pathogenen Mikroorganismen aus häuslichen Abwässern und Abwässern der Nutztierhaltung verschmutzen in Gebieten Subsahara-Afrikas mit industrieller Aktivität auch Mineralölkohlenwasserstoffe und Schwermetalle die Oberflächengewässer. Im Nigerdelta, einem der wichtigsten Hotspots aquatischer Biodiversität in Subsahara-Afrika (Anyanwu et al., 2023), sind die Auswirkungen der Erdölförderung auf Ökosysteme und die lokale Bevölkerung deutlich zu spüren (Kasten 4.5-1).

4.5.3

Zentrale Herausforderungen

Unabhängig vom gewählten sozioökonomischen Entwicklungs- und Emissionspfad ist häusliches Abwasser die größte Quelle der Wasserverschmutzung mit organischen

Kohlenstoffverbindungen und pathogenen Mikroorganismen (Jones et al., 2023). Entsprechend ist die Vermeidung der Einleitung ungeklärter oder nicht ausreichend behandelter häuslicher Abwässer in die Umwelt der effizienteste Weg, um der bestehenden und prognostizierten Wasserverschmutzung entgegenzuwirken. Global gesehen ist der Stand der geordneten Behandlung unbefriedigend: 80 % der globalen Abwässer gelangen unzureichend geklärt in die Umwelt; in Ländern niedrigen Einkommens werden nur 8 % der Abwässer überhaupt behandelt (UNESCO, 2017: 17). Die Verfügbarkeit von Sanitäreinrichtungen spielt dabei in Subsahara-Afrika eine bedeutende Rolle: Laut dem Bericht der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zu Abwasserentsorgung nutzen 51 % der Bevölkerung Subsahara-Afrikas unsichere, unhygienische Abwassersysteme wie Latrinengruben ohne Überbau oder praktizieren offene Defäkation (im Vergleich zu 26 % in Zentral- und Südasien und 1 % in Europa und Nordamerika; WHO, 2020: 39).

Siedlungsgebiete mit höheren Armutsraten, insbesondere urbane informelle Siedlungen weisen höhere Infrastrukturdefizite bei Wasserversorgung und -entsorgung auf (Kap. 4.2.2; Rusca et al., 2023; Sinharoy et al., 2019). Dies hat vielfältige Gründe: Zum einen sind zuständige staatliche Behörden mitunter nicht gewillt, ein zentrales Abwassersystem auf informelle Siedlungen auszudehnen, weil sie eine implizite Anerkennung dieser Siedlungen befürchten (Sinharoy et al., 2019). Weitere Gründe sind fehlende finanzielle Ressourcen für Bau und Betrieb (WHO, 2020: 86), insbesondere für die hohe Anfangsinvestition für den Bau einer Kanalisation, die Lage informeller Siedlungen am Stadtrand oder auf Gebieten, die bei Naturkatastrophen gefährdet sind sowie Befürchtungen der Betreiber, Infrastrukturmaßnahmen nicht über Abgaben der Bewohner:innen informeller Siedlungen refinanzieren zu können (Sinharoy et al., 2019).

Kasten 4.5-1

Das Nigerdelta: ein Biodiversitäts-Hotspot unter Druck

Im Nigerdelta sind die Folgen der industriellen Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika bereits heute sichtbar. Das Mündungsdelta am Golf von Guinea, das mit ca. 70.000 km² etwa so groß ist wie Irland, ist eines der größten Feuchtgebiete weltweit und beherbergt die größte Vielfalt aquatischer Arten in Afrika (Anyanwu et al., 2023). Dieser Biodiversitäts-Hotspot steht jedoch unter Druck: Aufgrund des starken Bevölkerungswachstums und der Landflucht in Nigeria breiten sich urbane Flächen rapide aus; zudem wird intensive Ölförderung betrieben (Anyanwu et al., 2023; Edegbene und Akamagwuna, 2022).

Vielerorts werden hohe Konzentrationen von Nährstoffen, Salzen, Mineralölkohlenwasserstoffen und Schwermetallen nachgewiesen (Anyanwu et al., 2023; Edegbene und Akamagwuna, 2022). Auswirkungen auf Makroinvertebraten, die eine Schlüsselrolle in Süßwasserökosystemen spielen, konnten festgestellt werden (Edegbene und Akamagwuna, 2022). Diese Verschmutzung von Ökosystemen wirkt auch auf die lokale Bevölkerung zurück, die die Gewässer des Nigerdeltas zur Fischerei, Bewässerung und Trinkwasserversorgung nutzt (Anyanwu et al., 2023). In Raubwelsen aus Flüssen des Nigerdeltas konnten erhöhte Konzentrationen oxidativer Stressmarker nachgewiesen werden, was darauf hindeutet, dass der Konsum dieser Fische nicht mehr unbedenklich ist (Arojoye et al., 2021).

Abgesehen von diesen praktischen Umsetzungsbarrieren ist das aus Hocheinkommensländern bekannte System einer zentralen Kanalisation und Abwasserbehandlung auch keine geeignete, standortgerechte Lösung für informelle Siedlungen in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens, weil damit nicht adäquat auf starkes und dynamisches Bevölkerungswachstum und schnelle Urbanisierung reagiert werden kann (Narayan et al., 2021). Außerdem ist die Ausweitung der in Hocheinkommensländern verbreiteten Schwemmkanalisation wegen des hohen Wasserbedarfs in Gebieten problematisch, die bereits unter Wasserstress leiden.

Statt einer zentralen Abwassersammlung und -behandlung spielen alternative Sanitärsystemlösungen wie dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme, also die dezentrale Sammlung von Abwasser in Klärtanks oder Latrinengruben mit Überbau, eine wichtige Rolle für die Sammlung, den Transport und die Behandlung von Abwasser in Subsahara-Afrika (41 % der Bevölkerung; WHO, 2020: 39). Bei unsicherem Management können jedoch auch hier erhöhte Risiken für die menschliche Gesundheit und für Ökosysteme auftreten (Kap. 7.3.2). Nicht abgedichtete Latrinengruben können das Grundwasser verschmutzen (Hubbard et al., 2020); Hygieneschutz der Arbeitskräfte bei Entleerung der Klärtanks und Latrinengruben ist oft nicht gewährleistet und ein großer Anteil des gesammelten Abwassers wird nach der Sammlung ungeklärt in Oberflächengewässern entsorgt (AfDB, 2020: 142).

Um SDG 6.2 „Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen für alle“, also eine flächendeckende sichere Abwasserentsorgung zu erreichen, können dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme dennoch einen bedeutenden Beitrag leisten, wenn gesundheitliche und ökologische Risiken adressiert werden. Die Regierung von Kenia plant beispielsweise, 40 % der Abwasserentsorgung mittels zentraler Abwassersysteme und 60 % mittels dezentraler Abwassersysteme abzudecken (World Bank, 2022: 3). In diesem Kontext hat ein Bericht der Weltbank (2022) gezeigt, dass Public-Private-Partnerships zu einer deutlichen Verbesserung der dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersysteme führen können. Auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) fordert in ihrem Bericht zum Stand der globalen Abwasserentsorgung, dass nationale Entscheidungsträger:innen die Schlüsselrolle anerkennen, die dezentrale Abwassersysteme für sichere Abwasserentsorgung spielen können, und dass die informellen, bestehenden dezentralen Abwassersysteme anerkannt und in das formale System integriert werden (WHO, 2020: 71; Kap. 7.3.1).

Weitere Ursachen für den unzureichenden Aufbau von Systemen zur dezentralen und zentralen Abwassersammlung und -behandlung sind Fehlstellen bei Finanzierung und Governance. Zwar haben die meisten Staaten Pläne

zur Implementierung von Abwasserentsorgung, stellen aber zu wenig finanzielle und personelle Ressourcen zur Erreichung der selbst gesteckten Ziele bereit (WHO, 2020: 15). Außerdem kommen nationale Fördermittel zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens oft nicht an der richtigen Stelle an. Eine Studie der Weltbank hat für zehn Länder niedrigen und mittleren Einkommens, davon fünf aus Subsahara-Afrika, ermittelt, dass 56 % der Fördermittel das reichste Fünftel der Bevölkerung erreichen, aber nur 6 % das ärmste Fünftel (Andres et al., 2019: 32). Ein weiteres Problem ist, dass internationale Geldgeber dazu tendieren, Trinkwasserversorgung gegenüber Sanitärsystemen zu priorisieren. So machten die finanziellen Beihilfen für Abwasserentsorgung in den Jahren 2010–2018 nur die Hälfte der Beihilfen für Trinkwasserversorgung aus (WHO, 2020: 15 f.).

Politische Prioritäten prägen die finanziellen Entscheidungen nationaler Regierungen. Der WHO-Bericht zum Stand der Abwasserentsorgung kritisiert in diesem Zusammenhang mangelnde politische Priorität und Führung auf hoher politischer Ebene für das Thema Abwassersammlung und -behandlung (WHO, 2020: 15). Zwar sank zwischen 2000 und 2017 global der Anteil der Bevölkerung, der seine Notdurft unter freiem Himmel verrichtet, von 21 % auf 9 % (WHO, 2020: 41). Doch dieser Fortschritt wurde in einigen wenigen Staaten erzielt, wohingegen der Fortschritt in anderen Staaten zu gering ist oder sogar Rückschritte verzeichnet werden (WHO, 2020: 34). Insbesondere die „Swachh Bharat Mission“ bzw. „Clean India Mission“, die zwischen 2014 und 2019 in Indien durchgeführt wurde, kann als positives Beispiel für die starke Führung einer Regierung dienen, die Abwasserentsorgung zur Priorität macht. Es handelt sich dabei um das weltweit größte Programm zur Verbesserung der Abwasserentsorgung, das zu einer langfristigen, deutlichen Abnahme offener Defäkation führte (WHO, 2020: 27).

Neben häuslichem Abwasser spielt das Abwasser aus der Nutztierhaltung eine entscheidende Rolle bei der Verschmutzung von Gewässern durch organische Kohlenstoffverbindungen und Pathogene. Bis Ende des Jahrhunderts wird ein substanzieller Anstieg der Nutztierhaltung und der durch sie verursachten Wasserverschmutzung prognostiziert, insbesondere im Szenario SSP5-RCP8.5 „fossil befeuerte Entwicklung“ (Wen et al., 2017; Jones et al., 2023). Grund dafür ist die steigende weltweite Nachfrage nach Fleisch- und Milchprodukten, deren Konsum in vielen Regionen und Bevölkerungsgruppen mit wachsendem Einkommen als erstrebenswert gilt (WBGU, 2023: 92).

4.6

Übernutzung des Grundwassers und Klimawandel im Central Valley, USA**25%**

der Obst- und Nussproduktion der USA stammen aus dem Central Valley

10%

sind die erwarteten Wasserverluste in der Region bis 2030

75%

der Brunnen erlitten eine Grundwasserabsenkung um 1,5 m (2018–2023)

Eingriffe des Menschen in den Wasserkreislauf zur Erfüllung gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Interessen können den Zustand von Ökosystemen und eine sichere Trinkwasserversorgung dauerhaft gefährden. Eine Region, in der sich die Folgen hochindustrialisierter bewässerungsintensiver Landwirtschaft und mehrjähriger Dürren besonders zeigen, ist das Central Valley im US-Bundesstaat Kalifornien (Kalifornisches Längstal). Knapp ein Viertel der Einzugsgebiete der Region gilt mittlerweile als kritisch übernutzt. Langfristige Grundwassererschöpfung verschärft das Risiko irreversibler Ökosystemschäden in Form von Bodenabsenkungen, Versalzung oder Meeresspiegelanstieg und gefährdet die Aufrechterhaltung einer sicheren Trinkwasserversorgung. Eine Häufung der Zeiträume von Spitzenentnahmen und -verlusten in Zeiten des Klimawandels zwingt die Politik zum Handeln, um die Versorgungssicherheit unter Inkaufnahme staatlicher Kosten zu gewährleisten.

4.6.1

Wirkungsmuster, Ausmaß und Projektionen

Kalifornien ist der bevölkerungsreichste und landwirtschaftlich produktivste US-Bundesstaat im Westen der USA mit einem hohen Wasserbedarf. Inmitten des Bundesstaates erstreckt sich das als „Fruchtgarten Amerikas“ bekannte Flusstal des Central Valley, mit über 600 km Länge und 80 km Breite, bekannt für den Anbau von unter anderem Mandeln, Datteln, Wein, Obst und Gemüse. Das Central Valley teilt sich in die Einzugsgebiete von Sacramento, San Joaquin und Tulare. Der „Wasserdurst“ zur Versorgung der Bevölkerung und bewässerungsintensiven Landwirtschaft im semiariden Klima des Central Valley ist enorm. Das Central Valley ist eine landesweit bedeutende landwirtschaftliche Region, die 25 % der Früchte und Nüsse der Vereinigten Staaten liefert (Love, 2024). Der Anbau wasserintensiver ganzjähriger Obst- und

Nussorten ist für viele Landwirt:innen aufgrund hoher wirtschaftlicher Erträge attraktiv, der Direktbezug von Grundwasser durch eigene Brunnen in den meisten Regionen weiterhin gering reguliert und kostengünstig (Davenport, 2023). Wasserknappheit ist in Kalifornien allerdings zunehmend ein Problem, mit ökologischen, ökonomischen und damit gesellschaftlichen Folgen.

Haupttreiber der Wasserknappheit im Central Valley sind eine jahrzehntelange Übernutzung der natürlichen Ressourcen und zunehmende Wasserverluste durch Verdunstung infolge des Klimawandels (Abb. 4.6-1; 4.6-2). Seit der Gründung Kaliforniens 1850 gelten in der Region überwiegend Flussanliegerrechte, nach denen Wasserzuteilungsrechte denjenigen gewährt werden, die Land entlang von Wasserläufen und natürlichen Reservoirs besitzen. Das Risiko möglicher Versorgungsengpässe aufgrund bewässerungsintensiver Landwirtschaft und hoher Temperaturen wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannt. In den 1930er Jahren folgte der Bau großangelegter Wasserleitungsprojekte wie dem Central Valley Project, dem Delta-Mendota Kanal oder dem California Aquädukt, um Wasser aus dem wasserreichen Norden und Osten in den trockeneren Süden und Westen zu verteilen (Faunt et al., 2016). Landwirt:innen bauten vermehrt private Brunnen, um Grundwasser direkt beziehen zu können und von überregionalen Verteilungssystemen unabhängig zu sein.

Trotz des frühen Infrastrukturausbaus, um Versorgungsquellen zu diversifizieren, hat sich das Risiko lokaler Wasserengpässe in den letzten Jahrzehnten erhöht. 11 der 45 Teileinzugsgebiete gelten laut Behörden als kritisch übernutzt (CNRA, 2023). Neben der hohen Nachfrage durch die hochindustrialisierte Landwirtschaft und dem Bedarf einer wachsenden Bevölkerung werden hohe Temperaturen und die Folgen des Klimawandels als weitere Treiber der unsicheren Versorgungslage gesehen (IPCC, 2022b). Seit den 1960er Jahren ist das Central Valley von mehrjährigen Dürreperioden betroffen. Wegen der dichten Abfolge lang anhaltender Trockenheitsphasen (2006–2011, 2011–2017 sowie 2019–2021) gilt der Zeitraum 2001–2021 als historisch trockenste Periode seit dem Jahr 800 (Liu et al., 2022). Da die Wassermenge aus Oberflächengewässern zunehmend nicht ausreicht, um die Versorgung zu sichern, steigen die Entnahmemengen aus dem Grundwasser. In besonders trockenen Jahren erreicht der Grundwasseranteil an der Versorgung bis zu 70 %, gegenüber 30 % in nassen Jahren (Faunt et al., 2016). Als eine Maßnahme des Dürrenotstands 2021–2022 wurde die Wasserversorgung an einige Agrarbetriebe aus dem Central Valley Project und dem State Water Project vollständig zurückgefahren, um die Grundbedarfe anderer Verbraucher sicherzustellen (Escriva-Bou et al., 2022a). Um diese Defizite auszugleichen, erhöhten Landwirt:innen die Entnahmemengen

4 Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

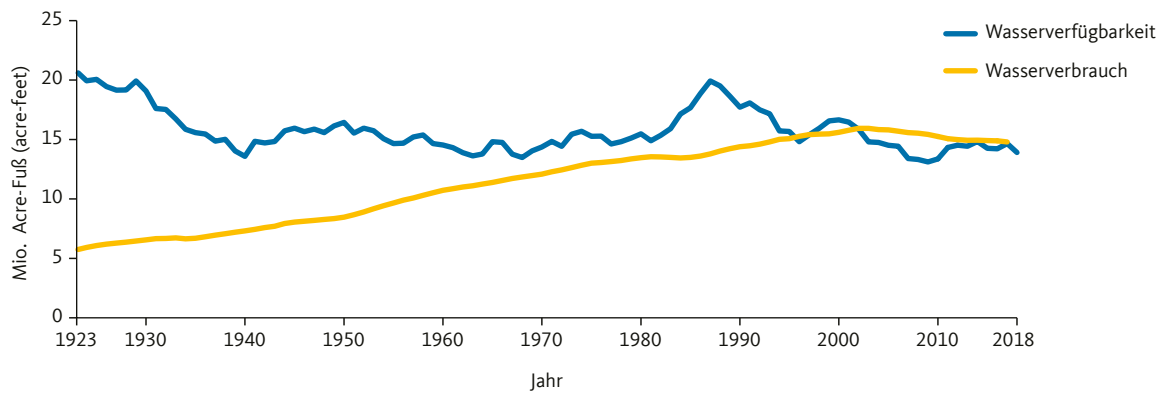


Abbildung 4.6-1

Entwicklung von Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch in Kalifornien 1923–2018. Seit 1923 schließt sich die Lücke zwischen Wasserverfügbarkeit und -verbrauch stetig, Mitte der 1990er Jahre liegt der Verbrauch erstmals über dem verfügbaren Wasser. Zwischen dem Anfang der 2000er und 2018 liegt der Verbrauch konsistent über dem verfügbaren Wasser. 1 Acre-Fuß entspricht 1.233 m³.

Quelle: PPIC, 2018

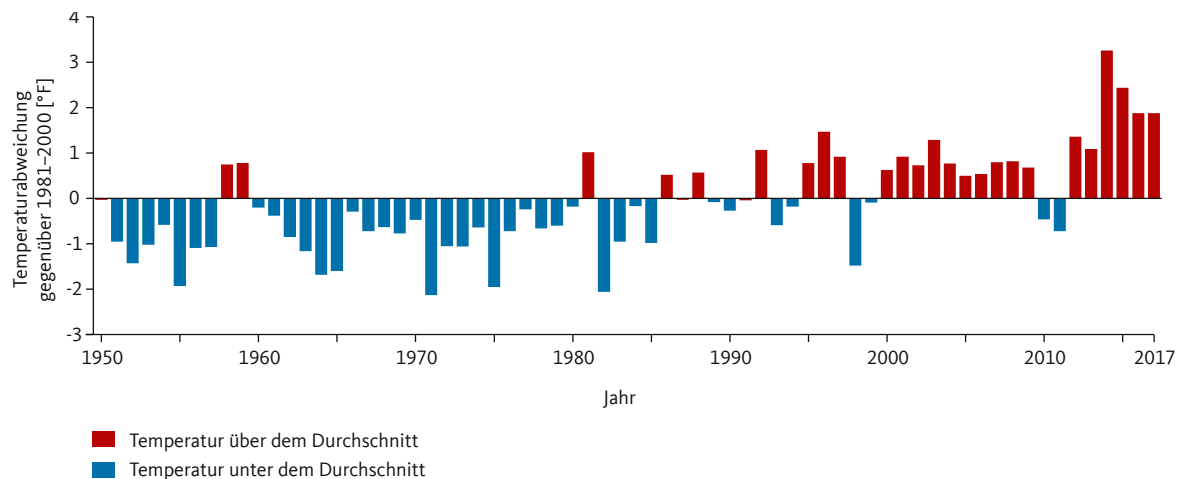


Abbildung 4.6-2

Jährliche Abweichungen von Lufttemperaturen in Kalifornien vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1981–2000. Bis 1980 sind die Abweichungen der Lufttemperaturen in den meisten Jahren niedriger, ab 1990 in den meisten Jahren höher als der Mittelwert des Referenzzeitraums. 32 °F = 0 °C.

Quelle: PPIC, 2018

aus dem Grundwasser. Rund 90 % der gesamten Grundwasserentnahmen Kaliforniens (rund 18,5 km³) entfielen 2021 auf das Central Valley (DWR, 2023) und der gemessene Grundwasserverlust erreichte mit 120 km³ seinen höchsten gemessenen Stand – dieser lag 2000 noch bei rund 60 km³ (Liu et al., 2022). Auch in anderen Regionen der USA steigt das Risiko des natürlichen Grundwasserverlustes, z. B. rund um San Francisco, in den Schwemmlandböden Arizonas, am oberen Teil des Colorado River sowie in den zentralen und südlichen Hochebenen (Scanlon et al., 2023).

Die Beschleunigung des Klimawandels verschärft eine ohnehin angespannte Situation in einer demografisch und wirtschaftlich wachsenden Region zusätzlich. Höhere Temperaturen, eine dünnere Schneedecke der Sierra Nevada, eine höhere Niederschlagsvariabilität, intensivere Dürreperioden und höhere Abflüsse gehen mit niedrigen Anreicherungen und einem sinkenden Dargebot einher.

Im Jahr 2023 endeten drei Jahre extremer Dürre, unter anderem wegen vieler Regen- und Schneefälle, die zu Überschwemmungen, aber auch zur Erholung

von Süßwasserspeichern wie dem Tulare-See führten (DWR, 2023). Mit 4,7 km³ wurde der größte Wassergewinn seit zwei Jahrzehnten verzeichnet. Der langfristige Erschöpfungstrend der Süßwasserressourcen konnte jedoch durch kurzfristige Erholungsphasen nur geringfügig abgeschwächt werden (Liu et al., 2022). Die

Schneedecke der Sierra Nevada könnte sich laut Prognosen bis Ende des Jahrhunderts um 60 % verringern, sie ist zentrale Quelle sämtlicher Süßwasserspeicher in der Region (PPIC, 2018). Bis 2040 rechnen Behörden mit einem Rückgang der Wasserverfügbarkeit in Kalifornien um 10 % (CNRA, 2023).

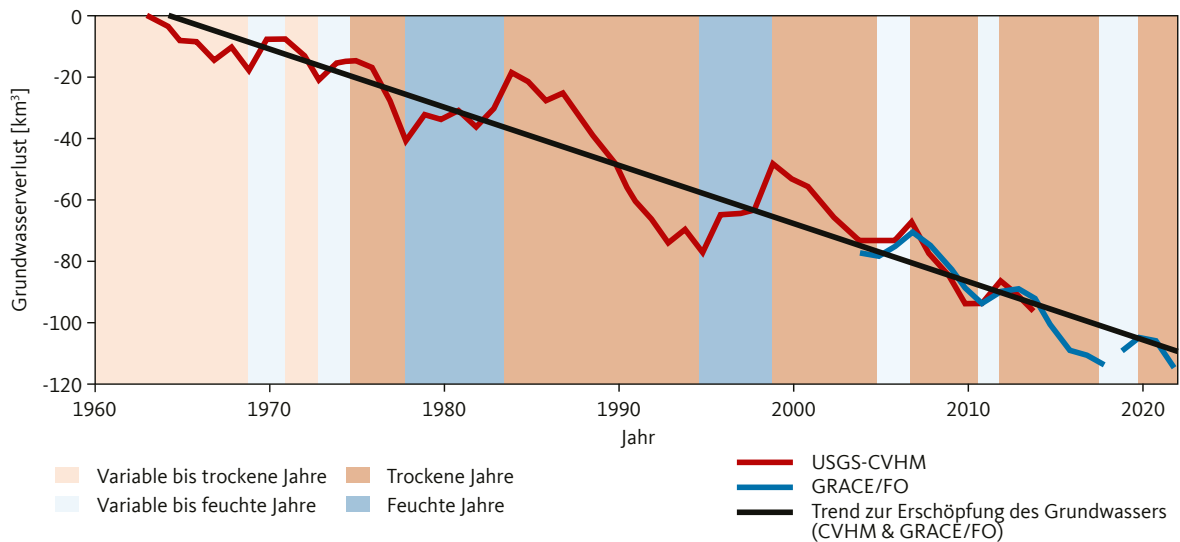


Abbildung 4.6-3

Grundwasserrückgang im Central Valley. Die Ergebnisse modellgestützter Schätzungen (USGS-CVHM- und GRACE/FO-Modell) zeigen einen jährlichen Grundwasserverlust von 1,86 km³ zwischen 1962 und 2021 und einen Gesamtgrundwasserverlust von 111,5 km³ bis 2021.

Quelle: Liu et al., 2022

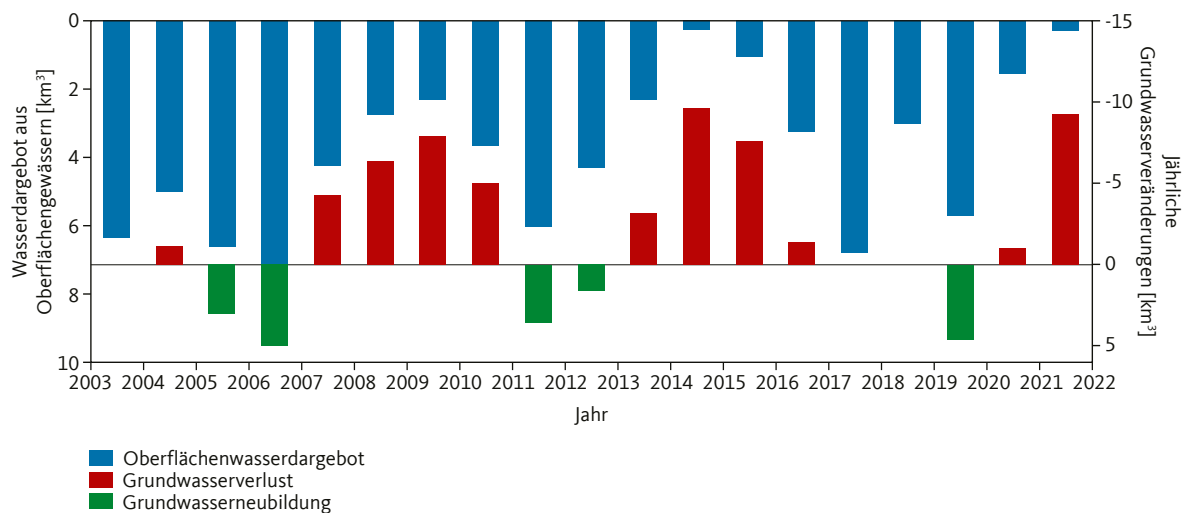


Abbildung 4.6-4

Wasserdargebot aus Oberflächengewässern und Zufluss bzw. Verlust der Grundwassermenge im Central Valley 2002–2022. Seit 2002 schrumpft das Dargebot aus Oberflächengewässern. Trotz Phasen der Erholung werden sukzessive neue Spitzen des Grundwasserverlusts erreicht.

Quelle: Liu et al., 2022

4.6.2
Ökologisches und sozioökonomisches
Destabilisierungspotenzial

Rund 91 % des in Kalifornien gemessenen Grundwasserverlusts im Jahr 2022 entfielen auf das Central Valley (CNRA, 2023). Der zunehmende Grundwasserverlust beeinträchtigt Umwelt und Ökosysteme u. a. durch erhöhte Risiken von Landabsenkungen, Erdrissen und Erdbeben, hydrologischen Dürren, Meeresspiegelanstieg, Grundwasserversalzung sowie durch den Verlust von Pflanzen und Tierarten (Bierkens und Wada, 2019; Huggins et al., 2022; Jasechko et al., 2024; Abb. 4.6-3, 4.6-4). Geologische Verschiebungen und Schädigungen grundwasserabhängiger Ökosysteme zählen zu den sichtbarsten Folgen des seit Jahren beobachteten Grundwasserrückgangs im Central Valley. Die hydrologische Struktur des Central Valley besteht aus einem System sich überlagernder, unterschiedlich durchlässiger Sedimentschichten. Mehr als die Hälfte der grundwasserführenden Schichten ist feinkörnig, überwiegend sand-, lehm- und schlickhaltig. Das Wasser in den grobkörnigen Schichten kann leicht entnommen werden und regelmäßiger Zufluss führt zu vergleichsweise geringen saisonalen Pegelschwankungen. Die meisten Brunnen des Central Valleys pumpen Wasser jedoch aus den tieferen weniger durchlässigen Grundwasserleitern mit geringerer Zuflussgeschwindigkeit und Erneuerungsrate. Die Entwässerung dieser tieferen grundwasserführenden Schichten durch regelmäßiges Abpumpen führt zu einer Verdichtung des Bodens, wodurch das Risiko für Landabsenkungen und Erdbeben steigt (Amos et al., 2014; Galloway et al., 1999).

Im Süden des Central Valley um El Nido und Arvin-Maricopa sank die Landoberfläche zwischen 1962–2014 um rund 1,5 m, in den besonders von Landabsenkungen betroffenen Teilregionen von Wasco-Tulare und Los Banos-Kettleman City um bis zu 3 m (Faunt et al., 2016).

Bodenabsenkungen wie im San Joaquin Valley sind laut Lees et al. (2022) zu 90 % auf Grundwasserentnahmen aus den tieferen Schichten des alluvialen Grundwassersystems zurückzuführen. Zwischen 1952–2017 sank der Wasserspiegel in den unteren wasserführenden Sedimentschichten im Süden des Central Valleys um rund 40 m. Zwar seien die Grundwasserleiter in nassen Jahren wie 2016 und 2017 teilweise aufgefüllt worden, doch selbst ein Stopp der Wasserentnahmen könne den langfristigen Trend der Verdichtung der überwiegend lehmhaltigen Schichten wie im San Joaquin Valley nicht umkehren (Lees et al., 2022). Bereits in Gang gesetzte geologische Verschiebungen könnten über Jahrzehnte bis Jahrhunderte hinweg Folgen nach sich ziehen.

Das Leerlaufen der Süßwasserspeicher beeinträchtigt neben Umwelt und Ökosystemen auch den Menschen. Landwirtschaftliche Betriebe und Haushalte mit eigenen Grundwasserbrunnen spüren diese Entwicklungen zunehmend. An mehr als 75 % der Brunnen im Central Valley sank der Grundwasserspiegel zwischen 2018 und 2023 um mehr als 1,5 m (CNRA, 2023). Der anhaltende Rückgang gefährdet bis 2040 bis zu 53 % der Grundwasserbrunnen in Kalifornien und die damit verbundene Trinkwasserversorgung (Bostic et al., 2023). Aus der verschärften Versorgungslage durch Brunnenentwässerung oder mangelnde Tiefe von Tauchpumpen resultieren weitreichende Risiken für die öffentliche Gesundheit. Eine unsichere Trinkwasserversorgung kann direkte und indirekte negative Folgen für die physische und mentale Gesundheit haben. Beispiele sind eine erhöhte Prävalenz von Durchfallerkrankungen, Dehydratation, Veränderungen im Darmmikrobiom, Mangelernährung, Wachstums- und Entwicklungsstörungen, eine beeinträchtigte kognitive Funktion, chronische Nierenerkrankungen und psychosozialer Stress (Rosinger und Young, 2020).

Bereits seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird in Kalifornien auf Maßnahmen zur Diversifizierung

Tabelle 4.6-1
Folgen von Dürre und Trockenheit in Kalifornien. Die Megadürre in den Jahren 2021–2022 führte im US-Bundesstaat Kalifornien zu hohen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Schäden.
Quelle: Escrivá-Bou et al., 2022a

+ 8 % zusätzlicher landwirtschaftlicher Wasserverbrauch
– 41 % Rückgang der Oberflächengewässer (Teilgebiete, Central Valley und North Coast)
+ 184 Mio. US- $\text{\$}$ Energiekosten durch Grundwasserpumpen
+ 160.000 ha zusätzlich stillgelegte Landwirtschaftsflächen
– 24 % Verlust von Ernteeinnahmen (Teilgebiet, Russian River Basin)
– 8.700 Teil- und Vollzeitbeschäftigte
+ 1.000 versiegte Grundwasserbrunnen
+ 33,5 cm Bodenabsenkung (Teilgebiet, San Joaquin Valley)

von Bezugsquellen gesetzt, z. B. über Stausysteme und Reservoirs sowie Wasserimporte über Pipelines und Kanäle, um Engpässe aufzufangen und die Versorgung zu stabilisieren. Der Beitrag großtechnischer Fernleitungssysteme zur Quellendiversifizierung gerät jedoch in Zeiten des Klimawandels zunehmend an seine Grenzen, unter anderem durch niedrigere Durchflussmengen und technische Ausfälle. In der Vergangenheit waren unter anderem der Delta-Mendota Kanal und der California Aquädukt von betrieblichen Einschränkungen betroffen.

Es ist fraglich, ob der 2014 verabschiedete Sustainable Groundwater Management Act ausreicht, um eine nachhaltige Versorgung bis 2042 wie geplant sicherzustellen. Die Vorschriften in den bisherigen Umsetzungsplänen der 35 Einzugsgebiete werden als wenig ambitioniert eingestuft. Vielmehr droht ein Versiegen von rund 9.000 privaten und 1.000 öffentlichen Brunnen und damit ein Rückgang des Grundwasserspiegels mit vergleichbarem Ausgang wie unter einer Fortführung des Status Quo (Bostic et al., 2023).

Durch den Rückgriff auf Grundwasserressourcen steigen gesundheitliche und soziale Risiken (Chappelle et al., 2021; Cushing et al., 2023). Natürliche und industriell bedingte Kontaminationen, z. B. mit Arsen, Uran, Nitrat oder PFAS, zu kontrollieren und eliminieren, gestaltet sich bei der Trinkwasseraufbereitung aus Grundwasser in der Regel aufwändiger und damit kostenintensiver als bei Oberflächenwasser. Für die Versorgung sozial benachteiligter Gruppen sind zudem überdurchschnittlich häufig kleine Wasserversorger (für bis zu 500 Menschen) zuständig. Die Aufbereitungskosten für die Versorger und damit die indirekten Kosten für Haushalte sind bei kleinen Versorgern oftmals höher als bei großen städtischen Versorgungsunternehmen. Um die Bezahlbarkeit und Wasserversorgung für sozial benachteiligte Gruppen dennoch zu ermöglichen, subventionieren einige Wasserversorger Wassertarife über „Lifeline Rates“-Programme, mithilfe derer besonders einkommensschwache Haushalte Vergünstigungen bei Wassertarifen lokaler Versorger erhalten können (Chappelle und Hanak, 2021).

4.6.3

Zentrale Herausforderungen

Mit der Zuspitzung der Versorgungslage hat die Grundwasserproblematik in Kalifornien an politischer Aufmerksamkeit gewonnen. Durch Einsparmaßnahmen konnten in den letzten Jahrzehnten erste Erfolge erzielt werden, zwischen 2000 und 2020 sank der Wasserverbrauch der Haushalte trotz gleichzeitigen Bevölkerungswachstums. Durch Dürrenotstandsmaßnahmen und Appelle zum Wassersparen konnten der Verbrauch zwischen 2014 und 2016 um 25 % gesenkt und langfristige

Wassereffizienzvorkehrungen eingerichtet werden. Nach der Umsetzung erster Maßnahmen steigen jedoch die Herausforderungen und Kosten, um weitere Effizienzgewinne zu erzielen (Ayres et al., 2023): Mit Wassereinsparungen von lediglich 4 % wurde das politisch gesetzte Ziel von 15 % während der Dürreperiode 2021–2022 zuletzt deutlich verfehlt (Escriva-Bou et al., 2022b; Tab. 4.6-1). Im Mai 2023 vereinbarten Arizona, Kalifornien und Nevada mit der Regierung in Washington, ihre jährlichen Entnahmen aus dem seit Jahren unter Dürren leidenden Colorado River gegen eine Ausgleichszahlung von 1,2 Mrd. US-\$ um 13 % zu reduzieren (Zeit Online, 2023). Der Ernst der Lage scheint vielen Akteuren mittlerweile bewusst. Bislang fehlt jedoch eine umfassende Strategie, die neben der Sicherung von Versorgungsquellen auch einen weiteren Anstieg des Wasserkonsums begrenzt.

Für eine umfassende Trendumkehr gibt es im Central Valley und in Kalifornien vorerst wenig Anzeichen. Nach Einschätzung des IPCC sind Rekordtemperaturen in Nordamerika aufgrund der Klimaerwärmung in Zukunft häufiger zu erwarten (IPCC, 2022b). Um sich an die Folgen einer unsicheren Wasserversorgungslage anzupassen und die natürlichen Speicher zu schonen, werden in Kalifornien seit Jahren verschiedene Ansätze verfolgt. So bestehen Bemühungen, um Wasserknappheit und die Folgen des Klimawandels in laufende Pläne auf Flusseinzugsgebietsebene zu integrieren. Ein Beispiel hierfür ist der Ansatz „One Water One Watershed“ (OWOW) der Santa Ana Watershed Project Authority (SAWPA) im Süden Kaliforniens. SAWPA ist eine Behörde mit gemeinsamer Zuständigkeit, die aus fünf regionalen Wasserdistrikten besteht und Trinkwasser für mehr als 6 Mio. Menschen sowie Industrie- und Bewässerungswasser bereitstellt. Mit dem OWOW-Programm will SAWPA Mehrgewinnstrategien und Projekte für einen nachhaltigen Wasserkreislauf im Flusseinzugsgebiet identifizieren und fördern. In der Planung sollen unter anderem Wasserversorgung, Wasserqualität, Regenwassermanagement, Wassernutzungseffizienz, Landnutzung, Energieverbrauch, Klimawandel und Lebensraum sowie die Interessen benachteiligter Gemeinschaften und Indigener berücksichtigt werden (SAWPA, 2024). Darüber hinaus gilt das Central Valley zudem als erfahren bei der Erprobung von Grundwasseranreicherungs- und Grundwasserspeicherungsmaßnahmen. Die Wiederauffüllung der Grundwasserspeicher gilt aufgrund geringer Verdunstungsraten im Vergleich zu Oberflächenspeichern als wenig anfällig gegenüber Temperaturerhöhungen. Um den Umgang mit hohem Wasseraufkommen nach Starkregenereignissen zu erleichtern und Schäden abzuwenden, können Maßnahmen der Wasserrückhaltung, -wiederverwendung oder -einspeisung gezielt eingesetzt werden. Dafür sind jedoch Pumpsysteme notwendig, deren Anschaffung und Bereitstellung in Phasen der

Tabelle 4.6-2

Veränderung der Gesamtwassermenge der großen Grundwasseraquifere der Welt. Das Central Valley steht an dritter Stelle (nach der Nordchinesischen Ebene und dem Ganges-Brahmaputra), mit einem Trend von $-12,1$ mm pro Jahr und $-13,9$ km³ innerhalb von 19 Jahren. TWS = Total Water Storage.

Quelle: Scanlon et al., 2023

Grundwasserspeicher	Land	Fläche [km ²]	TWS-Trend [mm pro Jahr]	TWS-Trend über 19 Jahre [km ³]
Nordchinesische Ebene	China	437.748	-11.5	-97.1
Ganges-Brahmaputra	Indien	634.565	-18.9	-231.5
Central Valley	USA	59.425	-12.1	-13.9
Arizona-Schwemmggebiet	USA	225.404	-7.9	-34.5
Upper Colorado	USA	369.857	-3.0	-21.3
C+S-Hochebene	USA	203.400	-6.8	-26.4
Paris	Frankreich	171.968	-3.6	-11.8
Tarim	China	468.333	-2.6	-28.8
Nubian	Sudan, Tschad, Libyen, Ägypten	2.203.920	-1.4	-59.9
Großes Artesisches Becken	Australien	1.727.400	0,9	30,4
Ogaden-Juba	Äthiopien	1.035.211	2,2	44,8
Guarani	Argentinien, Brasilien, Paraguay, Uruguay	1.865.481	2,8	100,2
MERAS	USA	202.960	3,8	15,0
Columbia	Kolumbien	114.178	4,3	9,5
Iullemeden	Mali, Niger, Nigera	594.821	5,1	58,8
Upper Kalahari	Namibia, Angola	989.348	5,7	108,6
Northern High Plains	USA	250.965	6,1	29,2

Nichtnutzung teuer ist (Gerenday et al., 2023). Um die Anreicherungsspotenziale auszuschöpfen, wird in einigen Distrikten Kaliforniens seit Jahren erfolgreich recyceltes Wasser zur künstlichen Grundwasseranreicherung verwendet (Faunt et al., 2016). Nach kalifornischem Wasserrecht entspricht recyceltes Wasser dem höchsten Qualitätsgrad (Trinkwasser) und ist nach Genehmigung vielseitig nutzbar. 2022 kündigte die kalifornische Regierung eine neue Strategie zur dauerhaften und umfangreichen Erhöhung der Wasserverfügbarkeit an. Vorgesehen sind unter anderem eine Erhöhung von Rückhaltekapazitäten um etwa 4.500 Mio. km³, eine Erhöhung des jährlichen Wasserrecyclings auf 990 Mio. km³ bis 2030, eine Verringerung der Verbrauchsmenge durch höhere Nutzungseffizienz um 616 Mio. km³, eine Erhöhung des Angebots durch Maßnahmen der Regenwasserrückhaltung und -behandlung (um etwa 310 Mio. km³) und ein Ausbau von Entsalzungsanlagen (um etwa 34 Mio. km³; CNRA, 2022, 2023). Zum Vergleich: Der

Wasserverbrauch im städtischen Einzugsgebiet der größten Stadt Los Angeles lag in den Hitzejahren 2021–2022 bei knapp 620 Mio. km³ (LADWP, 2024). Mit Resilienz- und Dürrenotfallmaßnahmen möchte die kalifornische Regierung zudem besser für künftige Notsituationen vorsorgen (CNRA, 2023).

Das Central Valley ist als grundwasserabhängige und semiaride Region weltweit nicht die einzige, in der sich lokal eine Erschöpfung der erneuerbaren Grundwasserressourcen mit weitreichenden Folgen für Natur und Gesellschaft abzeichnet. Auch der Nordosten Chinas (Hai He-Becken Aquifer der Nordchinesischen Ebene), der Norden Indiens (Ganges-Brahmaputra Aquifer), der Nordosten Südamerikas (São Francisco-Becken), der Südwesten und Süden der USA (Central und Southern High Plains), Osteuropa (Don- und Dnepr-Becken) und der Nahe Osten (Arabische Halbinsel, Iran) geraten durch jahrelange intensive Bewirtschaftung und die Folgen des Klimawandels an die Grenzen ihrer natürlichen

Belastbarkeit (Tab. 4.6-2; Scanlon et al., 2023). Die Erfahrungen des natürlichen Grundwasserrückgangs in Kalifornien zeigen jedoch exemplarisch, dass auch mit den technischen Möglichkeiten von Hoheinkommensländern eine Fortführung hochindustrialisierter Landwirtschaft einzelne Regionen an die Grenzen ihrer Belastbarkeit stoßen lässt (Jasechko et al., 2024).

4.7

Von regionalen Wassernotlagen zu Mustern mit planetarer Dimension

4.7.1

Ansatzpunkte für einen besseren Umgang mit Wassernotlagen

Typische Merkmale regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension sind negative Veränderungen im Wasserdargebot, der Wasserverfügbarkeit oder der Wasserqualität. Diese negativen Veränderungen können sich gegenseitig beeinflussen und Wirkungskaskaden mit teilweise selbstverstärkenden Effekten und trans-regionaler Reichweite bilden. Regionale Wassernotlagen können in ihren Dynamiken und Wechselwirkungen mit Verschärfungen wasserbezogener Probleme (Kap. 3) in einer planetaren Notlage münden, wie beispielsweise einer Ernährungskrise.

Aus der Analyse der hier exemplarisch ausgewählten regionalen Wassernotlagen lassen sich einige aus Sicht des WBGU zentrale Ansatzpunkte für den Umgang mit den damit verbundenen Risiken für Natur und Mensch ableiten (Kap. 5; Tab. 4.7-1). Dazu zählen neben einem konsequenten Klima- und Biodiversitätsschutz eine langfristige Risikobewertung, klimaresilientes Wassermanagement, die Stärkung gesellschaftlicher Resilienz, die Renaturierung von Ökosystemen, die Sicherstellung der Finanzierung von (Anpassungs-)Maßnahmen sowie eine verbesserte Datenerhebung für belastbarere Langzeitprojektionen.

Übergreifend besteht hier eine Aufgabe zur trans-regionalen und multilateralen Kooperation (Kap. 8.1): Die hier ausgewählten Regionen stehen beispielhaft für die Ausprägung regionaler Wassernotlagen. Diese Wirkungsgefüge und Muster finden sich auch in vielen weiteren Regionen, in den meisten Fällen über alle Kontinente und Länder unterschiedlicher Wirtschaftskraft und politischer Organisation verteilt. Deshalb ist es notwendig, globale und gemeinsame Antworten zu finden.

Betroffene Regionen sind vielfach unzureichend auf Wasserkrisen vorbereitet

In den angeführten Beispielen für regionale Wassernotlagen zeigt sich, dass die von solchen Krisenmustern bedrohten bzw. betroffenen Regionen unzureichend auf die sich mittel- und langfristig stellenden Herausforderungen vorbereitet sind. In vielen Regionen dominieren aktuelle wirtschaftliche und gesellschaftliche Zwänge oder Interessen bzw. Pfadabhängigkeiten in der Wasserinfrastruktur. Dies geht zumeist zulasten langfristiger Vorkehrungen. Ein Beispiel ist der Zerfall der Bewässerungsinfrastruktur in Post-Sowjet-Zentralasien. Die Transformation von zentralisierter Planwirtschaft hin zur Eingliederung in eine globalisierte Marktwirtschaft stellte die Gesellschaften Zentralasiens von den frühen 1990er bis in die 2010er Jahre vor substanzielle wirtschaftliche und politische Herausforderungen. Ökologische und klimatologische Abwägungen und entsprechende Politikgestaltung für ein nachhaltiges Wassermanagement wurden selten priorisiert.

Soziale Gruppen und Gesellschaften sind sehr unterschiedlich betroffen

Verschärfungen wasserbezogener Probleme und regionale Wassernotlagen wirken sich unterschiedlich auf soziale Gruppen und Gesellschaften aus. Die Fähigkeit zur Krisenbewältigung ist unter vulnerablen Gruppen weltweit und vor allem in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens, deren Lebenssicherungssysteme häufig stark naturnah und oft direkt wasserabhängig sind (z. B. Landwirtschaft), am geringsten. Die Resilienz sozialer Gruppen und Gesellschaften gegenüber Verschärfungen wasserbezogener Probleme und regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension kann vor allem durch Stärkung ihrer Handlungsfähigkeit verbessert werden. Internationale Kooperation für nachhaltiges Wassermanagement ist hier von besonderer Bedeutung. Dabei gilt es sicherzustellen, dass mit groß- wie kleinskaligen Wassernutzern kooperativ Projekte entwickelt werden, die sensibel für geschlechtsspezifische Rollenverteilungen sind. So ist beispielsweise die flächenintensive Landwirtschaft und Produktion für den Export in vielen Ländern männlich dominiert, während der für die lokale Ernährungssicherheit und -vielfalt relevante kleinskalige Gemüse- und Obstanbau in weiblicher Hand ist.

Entsprechend gilt es, internationale Kooperation und auch Wissenschaftskooperationen im Bereich des nachhaltigen Wassermanagements dem gesellschaftlichen Organisationsmuster entsprechend zu gestalten und mittels Wasserk Kooperationen gesellschaftlichen Zusammenhalt und Widerstandsfähigkeit zu fördern. Dafür braucht es einen gestaltenden Staat, der rechts- und sozialstaatlichen Prinzipien folgt und gesellschaftliche Selbstorganisation unterstützt.

4.7.2

Lücken im Verständnis regionaler Wassernotlagen

Das Verständnis über die langfristigen Dynamiken und die damit verbundenen regionalspezifischen Risiken ist noch lückenhaft. Deshalb werden eine besser räumlich aufgelöste Datengrundlage, zuverlässigere Projektionen und regionalspezifische Modellierung benötigt. Die derzeitigen Projektionen können vor allem zukünftig zu erwartende Extreme nicht ausreichend abbilden, auch weil Veränderungen durch den Klimawandel erst seit kurzer Zeit greifen und die Variabilität der Klimaereignisse nicht umfänglich darstellbar ist. Es sollte daher ein Weg gefunden werden, die jüngsten Beobachtungen und Forschungsergebnisse adäquat in die Projektionen einzubinden und dabei deren räumliche Auflösung zu verbessern. So könnten Projektionen von Extremereignissen ein zuverlässigeres Bild liefern und dabei helfen, regionalspezifische Anpassungsmaßnahmen zu verbessern:

- In der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region bestehen große Lücken in der Datenerfassung. Dies betrifft u. a. die zukünftige Wasserverfügbarkeit und den Wasserbedarf, insbesondere auch Verknüpfungen zwischen Ober- und Unterlauf, Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität sowie die Wirksamkeit unterschiedlicher Anpassungen an Naturgefahren (technisch, naturbasiert, institutionell). Veränderungen im Permafrost, die die beobachteten Risiken teilweise noch verstärken können, sind noch wenig erforscht und quantifiziert. Auch ist noch nicht quantifizierbar, was die Veränderungen der Kryosphäre für die Lebensgrundlagen der Bevölkerung (insbesondere in den Hochlagen) bedeuten, die zu einem großen Teil von der Natur abhängig ist.
- Durchschnittswerte zur Wassersituation in Städten bilden oft nicht das ganze Bild ab. Eine differenziertere Übersicht ergeben Daten über den Zugang zu Wasser und den Wasserverbrauch, aufgeschlüsselt nach sozioökonomischen Gruppen und Stadtquartieren. Deshalb ist es nötig, die urbane Datenerhebung stärker räumlich und sozial zu differenzieren.
- In vielen Ländern der MENA-Region wird das Wassermanagement durch mangelnde Kapazitäten lokaler Behörden erschwert. Regionen sind durch bewaffnete Konflikte zum Teil unzugänglich oder erhobene wasserbezogene Daten werden nicht ausreichend geteilt (Houdret und von Lossow, 2023). Dies behindert die Zusammenarbeit zwischen Sektoren und Staaten, z. B. sind Schwankungen in der Menge und Qualität des Grundwassers oft unsichtbar.

- Es besteht Bedarf an Projektionen über die Verschmutzung von Oberflächengewässern bis Ende des Jahrhunderts, die möglichst alle Quellen der Verschmutzung (u. a. häusliches Abwasser, landwirtschaftliche Bewässerung, Nutztierhaltung, Industrie) sowie Verdünnungseffekte und Abbauprozesse in den Gewässern berücksichtigen. Diese Projektionen sollten mehrere Wasserqualitätsparameter (z. B. Stickstoff, gelöste Feststoffe, pathogene Mikroorganismen) und verschiedene sozioökonomische Entwicklungspfade und Emissionsszenarien einbeziehen, um verschiedene Verschmutzungsarten zu erfassen, die Bandbreite der Szenarien abzudecken und die Vergleichbarkeit der Studien zu erhöhen.

Zum potenziellen Ausmaß, der regionalen Verteilung und der Bandbreite regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension und ihren Interaktionen untereinander steht die Forschung vielfach noch am Anfang.

Tabelle 4.7-1

Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension: Risiken, Maßnahmen sowie überregionale und globale Handlungsbedarfe. Die Tabelle zeigt, welche Risiken sich aus der jeweiligen Wassernotlage für Mensch und Natur ergeben und welche zentralen Maßnahmen sich daraus ableiten lassen.

Quelle: WBGU

Wassernotlage	Wesentliche Risiken für Mensch und Natur	Zentrale Maßnahmen	Überregionale und globale Handlungsbedarfe
Wasserknappheit in Städten und urbanen Agglomerationen	> Beeinträchtigung der Wasserversorgung > Beeinträchtigung der sanitären Versorgung > Gesellschaftliche und politische Destabilisierung	> Infrastrukturausbau beschleunigen > Pfadabhängigkeiten und Klimaprojektionen berücksichtigen > Schwammstadtkonzept umsetzen > Gesamtes Wassereinzugsgebiet im Blick haben	Klima- und Biodiversitätsschutz vorantreiben Forschung: Datenerhebung für belastbare Langzeitprojektionen vorantreiben
Zunehmende Dürren und Sturzfluten	> Beeinträchtigung der Wasserversorgung > Direkte gesundheitliche Risiken > Verlust von Einkommen bzw. Lebensgrundlagen > Gesellschaftliche und politische Destabilisierung > Auswirkungen Ernährungssicherheit > Schädigung/Zerstörung von Ökosystemen	> Regionsspezifische Lösungsansätze generieren > Katastrophenvorsorge bzw. Frühwarnsysteme implementieren > Langfristig nachhaltige Wassernutzung planen und umsetzen > Einbindung von Maßnahmen in politische und sozioökonomische Reformen > Wasserspeicher etablieren, die auch Sturzfluten auffangen	Risikobewertung und -vermeidung: > Monitoring, Frühwarnsysteme und Katastrophenvorsorge (weiter-) entwickeln > Grenzen der Beherrschbarkeit identifizieren Adaptive, innovative und resiliente Planung bzw. Management beschleunigen und Wassernutzung nachhaltiger und effizienter gestalten
Gletscherschmelze	> Beeinträchtigung der Wasserversorgung > Naturgefahren als Bedrohung für Menschenleben und Infrastruktur > Gesellschaftliche und politische Destabilisierung > Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit > Schädigung/Zerstörung von Ökosystemen	> Zwischenstaatliche Abstimmung bzw. Kooperation verstärken > Risikovorsorge und Katastrophenmanagement ausbauen und fehlende Datengrundlage verbessern > Wassernutzung verschiedener Sektoren effizienter und nachhaltiger gestalten > Alternative Wasserspeicher etablieren	Gesellschaftliche Resilienz stärken: > Politische und gesellschaftliche Teilhabe > Überregionale und globale Kooperation > Bildung Renaturierung fördern (grünes und blaues Wasser)
Wasserverschmutzung	> Direkte gesundheitliche Risiken > Schädigung/Zerstörung von Ökosystemen	> Häusliches Abwasser/WASH: Infrastrukturlösungen anpassen > Politische Priorität erhöhen > Zunehmende Abwässer aus Landwirtschaft und Industrie behandeln	Innovative Finanzierungsansätze entwickeln
Übernutzung des Grundwassers	> Schädigung/Zerstörung von Ökosystemen > Beeinträchtigung von Infrastruktur und Technik > Beeinträchtigung der Wasserversorgung > Gesellschaftliche und politische Destabilisierung > Direkte gesundheitliche Risiken > Verlust von Einkommen bzw. Existenzen	> Auch in Hocheinkommensländern Trinkwasserversorgungsrisiken beachten > Innovative Ansätze zum Umgang mit steigenden Risiken wagen > Wasserbilanzierungsansätze und Instrumente der Kapitalmarktfinanzierung nutzen	



In einer aufgeheizten Welt mit kritischen klimatischen, ökologischen, sozio-ökonomischen und geopolitischen Entwicklungen werden Gesellschaften an Grenzen der Beherrschbarkeit stoßen. Zentral sind ein Stopp des anthropogenen Klimawandels sowie transformative Anpassungsmaßnahmen, um Abstand von diesen Grenzen zu wahren. Für den Fall, dass alle Anpassungsoptionen erschöpft sind, müssen Rückzugsmöglichkeiten vorbereitet werden. Welche Risiken nicht mehr hingenommen werden und welcher Anpassungspfad beschritten werden soll, ist auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

Wasser ist in vielen Teilen der Welt häufig nicht in benötigtem Umfang und erforderlicher Qualität verfügbar (Kap. 2). Klimawandel und die Degradation von Ökosystemen führen zusammen mit sozioökonomischen und geopolitischen Veränderungen zu Verschärfungen wasserbezogener Probleme (zu viel – zu wenig – zu verschmutzt; Kap. 3). Diese können in regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension münden (Kap. 4). In Gefährdungsgebieten für solche regionalen Wassernotlagen müssen frühzeitig Aushandlungsprozesse über akzeptable Risiken und die noch akzeptable Eingriffstiefe von Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden, da Anpassung nur mit und nicht gegen die Bevölkerung gelingen kann (Kap. 5.2). Dazu sollten öffentliche Foren eingerichtet werden. Bei der Abschätzung von Risiken und Unsicherheiten spielt auch die Wissenschaft eine wichtige Rolle. Zudem ist Vorsorge im Rahmen eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts ein wichtiger Baustein zur Vermeidung extremer Wassernotlagen.

Veränderungen von Wasserdargebot, -qualität, -verfügbarkeit und -nachfrage sowie das Auftreten von Extremereignissen mit Auswirkungen jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums nehmen zu. Im Extremfall werden menschliche Gesellschaften mit den Grenzen der Beherrschbarkeit konfrontiert. Um dafür zukünftig besser gerüstet zu sein, müssen diese Grenzen frühzeitig erkannt (Kap. 5.1), Handlungsbedarfe identifiziert (Kap. 5.2) und Entscheidungen für den Fall der Ausschöpfung aller Anpassungsoptionen vorbereitet werden (Kap. 5.3).

5.1

Grenzen erkennen

In Zukunft ist mit dauerhaft fortschreitenden, beschleunigten Änderungen im globalen Wasserkreislauf zu rechnen, bei denen sich die Auswirkungen des Klimawandels, die Übernutzung der Wasserressourcen, die ungleiche Verteilung von Wasser, die Degradation und der Verlust von Ökosystemleistungen sowie Gefährdungen durch wasserbezogene Gesundheitsrisiken weiter verschärfen (Kap. 3). Aus dem Zusammenspiel dieser Faktoren können regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension entstehen, bei denen Grenzen der Beherrschbarkeit erreicht werden: Menschen und Ökosystemen der betroffenen Regionen werden die Lebensgrundlagen entzogen. Angesichts der prognostizierten klimatischen, ökologischen, sozioökonomischen und geopolitischen Entwicklungen ist zu erwarten, dass derartige Grenzzustände und regionale Wassernotlagen weltweit immer häufiger erreicht werden. Ohne zeitnahes proaktives Handeln und transformative Politik können in betroffenen Regionen Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden (Abb. 5.1-1).

Um einen sicheren Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit zu halten sind Maßnahmen auf globaler, lokaler und regionaler Ebene erforderlich:

Erstens müssen Verschärfungen im Wassersektor (Kap. 3), die als globale Treiber direkt auf den globalen

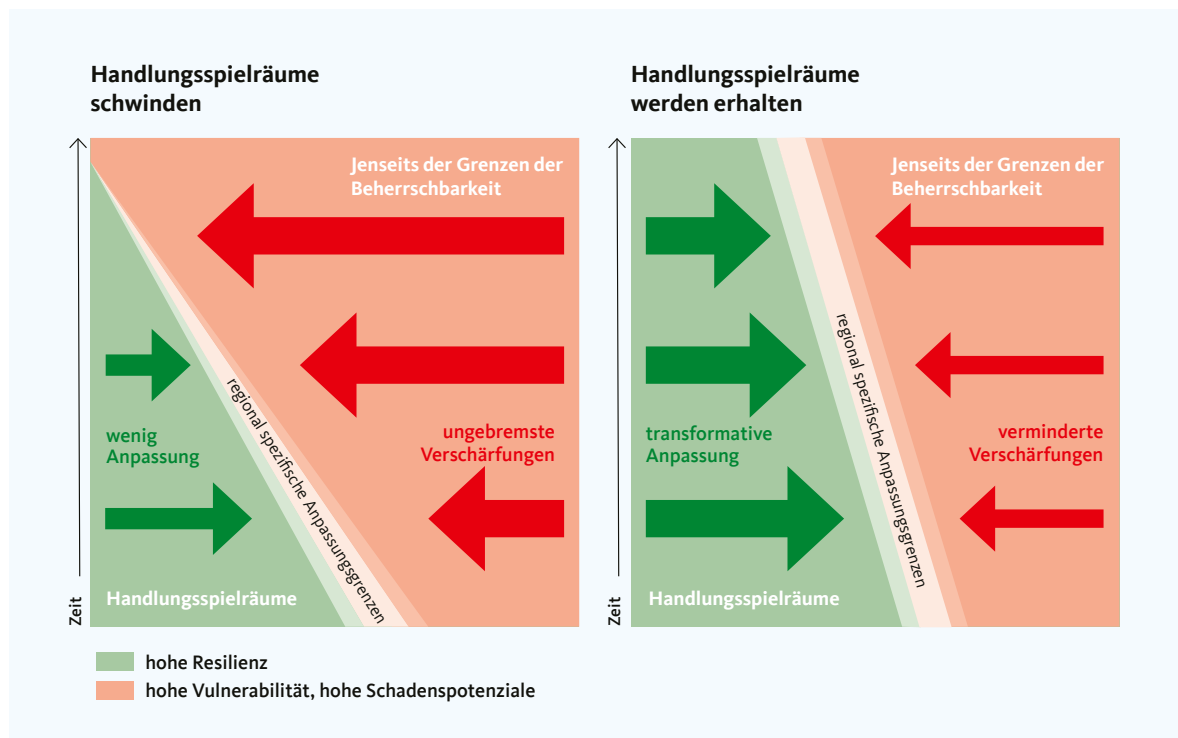


Abbildung 5.1-1

WBGU-Konzept zu Grenzen der Beherrschbarkeit. Durch ungebremste Verschärfungen bei Wasserdargebot, -verteilung und Extremereignissen und zu geringe Anpassung besteht die Gefahr, dass regionale Wassernotlagen entstehen und Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden. Jenseits dieser Grenzen, die sich regional unterscheiden können, sind die Risiken intolerabel hoch (roter Bereich). Welche Risiken als intolerabel eingeschätzt werden und welche Anpassungspfade im Einzelnen beschränkt werden sollten, ist auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

Links: Werden nur geringe Anpassungsmaßnahmen vorgenommen schwinden Handlungsspielräume (grüner Bereich).

Wasserbezogene Verschärfungen durch zunehmenden Klimawandel, Ökosystemdegradation und Verschmutzung sowie sozio-ökonomische und geopolitische Entwicklungen können ihre ganze Wucht entfalten. Vulnerabilität und Schadenspotenziale nehmen zu, im Zeitverlauf steigt die Gefahr, Grenzen der Beherrschbarkeit zu überschreiten.

Rechts: Transformative Vorsorge steigert die Resilienz und vermindert die Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen, gleichzeitig werden die Verschärfungen selbst in Grenzen gehalten. Handlungsspielräume (grüner Bereich) werden auch längerfristig erhalten.

Quelle: WBGU

Wasserhaushalt wirken, in Grenzen gehalten werden: Voraussetzung dafür ist eine ambitionierte Klimapolitik einschließlich der Einhaltung der Ziele des Pariser Übereinkommens. Nur so können die klimawandelbedingten Änderungen des globalen und lokalen Wasserhaushalts begrenzt werden. Ebenso zentral ist die Umsetzung des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal (Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework, GBF), um die elementare Rolle der Natur im globalen Wasserhaushalt zu schützen. Je früher gehandelt wird, desto mehr Handlungsoptionen bestehen.

Zweitens müssen regionale Wassernotlagen (Kap. 4) möglichst vermieden werden. Gelingt es nicht, wasserbezogene Verschärfungen einzuhegen, verstärken sich

bestehende regionale Wassernotlagen und es steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens weiterer Wassernotlagen mit planetarer Dimension: Zu ihrer Abwehr bedarf es transformativer Anpassungsmaßnahmen (Kasten 5.1-1) und eines klimaresilienten Wassermanagements mit transformativer Eingriffstiefe, da bisherige (inkrementelle) Anpassungsmaßnahmen nicht mehr ausreichen werden. Konkret bedeutet dies die Bereitschaft zu radikaler Umsteuerung, insbesondere durch die Gestaltung eines Strukturwandels, etwa in der Landnutzungs-, Industrie-, Siedlungs- und Infrastrukturpolitik – national sowie im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit.

Da ein sicherer Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit nicht immer eingehalten werden kann, müssen

sich gefährdete Regionen frühzeitig auf einen Plan B vorbereiten. Helfen auch transformative Maßnahmen nicht mehr weiter, ist gegebenenfalls ein geordneter rechtzeitiger Rückzug die letzte Gestaltungsoption. Dort, wo Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden, reduzieren sich Handlungsmöglichkeiten auf ein reaktives Krisen- und Katastrophenmanagement, das den Rückzug begleitet.

Um eine wassergerechte Zukunft und Bewahrung der Lebensgrundlagen zu gewährleisten, bedarf es einer vorsorgenden Wasserpolitik und vorausschauender, transformativer Anpassungsmaßnahmen. Diese notwendigen Transformationen sind nicht auf den Wassersektor begrenzt und zielen nicht allein auf Gefahrenabwehr. Sie erfordern globales Handeln wie Klimaschutz sowie Schutz, Erhaltung und Renaturierung von Ökosystemen, Handeln auf regionaler bzw. auf Ebene von Wassereinzugsgebieten sowie lokales Handeln (Städte, Dörfer) gleichermaßen, um einen ausreichenden Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit zu wahren.

In besonders gefährdeten Regionen können Kippunkte erreicht werden. Es ist daher von höchster Dringlichkeit, das Thema Wasser höher auf der internationalen Agenda zu verankern. Das derzeitige starke Momentum durch die UN-Wasserkonferenzen 2023, 2026 und 2028 muss von den Regierungen genutzt werden, um weltweit durch umfassende Vorsorge ausreichenden Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit einzuhalten. Kurzfristig sollten Institutionen umgehend beginnen effektive Strategien zu entwickeln, die mittelfristig die weltweite

wasserbezogene Kooperation stärken. Vorsorgende Wasserpolitik kann jedoch nur gelingen, wenn auch in anderen Politikfeldern zeitgerecht Fortschritte gemacht werden. Zentral zu nennen sind hier die Klimaschutzziele des Pariser Übereinkommens.

Wasser sollte als eigene Dimension (Verfügbarkeit und Qualität von blauem und grünem Wasser sowie Anpassung an neue Gefährdungen) und mit eigenen Indikatoren in den nationalen Umsetzungsmechanismen der Agenda 2030, des Pariser Übereinkommens und des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal (GBF) integriert und stärker sichtbar werden. Wasserziele sind bereits ein zentraler Bestandteil der Agenda 2030; der Zugang zu Trinkwasser, Sanitärversorgung und die Umsetzung des IWRM bleiben jedoch weiterhin eine Herausforderung (Kap. 8.3).

Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie zur nationalen Umsetzung der Agenda 2030, die derzeit weiterentwickelt wird, thematisiert Verbesserungsbedarf bei der Wasserqualität und nötige Anpassungen an Folgen des Klimawandels. Sie sollte die großen Herausforderungen durch wasserbezogene Verschärfungen und zunehmende Unsicherheiten und Schwankungen des Wasserdargebots auch in Deutschland stärker als bisher anerkennen und das weitere Vorgehen hierzu detaillieren. Hierbei spielen im deutschen Kontext die Nationale Wasserstrategie von 2023 und die noch zu entwickelnde Klimaanpassungsstrategie eine zentrale Rolle. Ihre Wirksamkeit wird u. a. davon abhängen, ob sie mit genug Ressourcen, geeigneten Institutionen und Prozessen unteretzt werden.

Kasten 5.1-1

Anpassung, Anpassungsgrenzen und Grenzen der Beherrschbarkeit

Anpassung in ökologischen Systemen umfasst autonome Anpassungen durch ökologische und evolutionäre Prozesse an das veränderte Klima und seine Auswirkungen, z. B. an die veränderten Wasserverfügbarkeiten. In menschlichen Systemen kann Anpassung nicht nur reaktiv, sondern auch vorausschauend erfolgen. Der IPCC unterscheidet zudem zwischen inkrementeller und transformativer Anpassung – letztere meint Anpassung, bei der grundlegende Eigenschaften eines sozial-ökologischen Systems verändert werden.

Der IPCC verwendet weiterhin den Begriff der Anpassungsgrenzen: Sie bezeichnen „den Punkt, an dem die Ziele eines Akteurs (oder Systembedürfnisse) nicht durch Anpassungsmaßnahmen vor untragbaren Risiken geschützt werden können“ (IPCC, 2022b: 7). Dabei wird zwischen harten und weichen Anpassungsgrenzen unterschieden: Ist eine harte Anpassungsgrenze erreicht, sind keine Anpassungsmaßnahmen möglich, um untragbare Risiken zu vermeiden. Bei einer weichen Anpassungsgrenze gibt es zwar Möglichkeiten, un-

tragbare Risiken durch Anpassungsmaßnahmen zu vermeiden (IPCC, 2022b: 84), diese sind aber derzeit nicht verfügbar, benötigen z. B. höheren finanziellen oder technologischen Aufwand. Je nach Ausmaß des Klimawandels identifiziert der IPCC wasserbezogene Anpassungsgrenzen in verschiedenen Regionen: Oberhalb von 1,5 °C globaler Erwärmung stellen begrenzte Süßwasserressourcen potenzielle harte Grenzen für kleine Inseln und für Regionen dar, die von der Gletscher- und Schneeschmelze abhängig sind. Bei spätestens 3 °C globaler Erwärmung zeigen die Projektionen in vielen Regionen für einige wasserwirtschaftliche Maßnahmen weiche Grenzen und in Teilen Europas harte Grenzen. Der Übergang von inkrementeller zu transformativer Anpassung kann laut IPCC helfen, weiche Anpassungsgrenzen zu überwinden (IPCC, 2022b: 129).

Der in diesem Gutachten verwendete Begriff der Grenzen der Beherrschbarkeit ist konzeptionell an die vom IPCC definierten „harten Anpassungsgrenzen“ angelehnt: Grenzen der Beherrschbarkeit beschreiben den Übergang zu wasserbezogenen Krisenlagen, die untragbare Risiken mit sich bringen. Diese zu vermeiden erfordert vorausschauendes und gegebenenfalls transformatives Handeln. Falls sie sich nicht mehr vermeiden lassen, muss mit den Risiken bestmöglich umgegangen werden, um Schäden zu minimieren.

Ein Gelegenheitsfenster für die Weiterentwicklung auf internationaler Ebene bieten die anstehenden Verhandlungen zur Post-2030 Agenda und die Biodiversitätsgovernance: Das 2022 beschlossene GBF wird durch nationale Strategien und Aktionspläne umgesetzt, die sich derzeit in vielen Ländern in Überarbeitung befinden. Hierbei kann der vom WBGU empfohlene Ansatz eines multifunktionalen Flächenmosaiks, bei dem Schutz und Nutzung zusammengedacht werden, um Mehrgewinne für Natur und Mensch zu erzielen, den Landschaftswasserhaushalt und die Speicherkapazität von Wasser in der Natur stärken helfen (WBGU, 2020; WBGU, 2024).

5.2

Handlungsbedarfe und -prinzipien

Der WBGU empfiehlt ein klimaresilientes Wassermanagement, das sich an demokratisch ausgehandelten Zielen, Prinzipien und Regeln über tolerierbare Risiken und einem tragfähigen Umfang von Anpassungsmaßnahmen orientiert (Kap. 5.3). Als Grundlage für diesen Aushandlungsprozess schlägt der WBGU sieben Handlungsprinzipien vor (zur Umsetzung siehe Kap. 6.1.2). Die Prinzipien umfassen einen neuen Umgang mit schwindender Stationarität, Resilienz und Risikovorsorge, die Einbeziehung blauen und grünen Wassers, die zentrale Rolle der Wissenschaft, die monetäre und nichtmonetäre Wertschätzung von Wasser sowie eine Umsetzung durch einen gestaltenden Staat mit der Förderung von Selbstorganisation. Neben den sieben Prinzipien ist eine konsequente Klima- und Biodiversitätspolitik Grundvoraussetzung zur Erhaltung von Handlungsspielräumen. Die Prinzipien informieren darüber hinaus die Diskussion darüber, wie sich Gesellschaften an nicht mehr vermeidbare Änderungen anpassen können.

5.2.1

Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur sicherstellen

Wasser muss als globales, Leben spendendes Gemeinschaftsgut nach den Bedürfnissen aller Menschen und der Natur verteilt und gespeichert werden. Naturbasierte, technische und institutionelle Lösungen für die Sicherstellung einer resilienten Wasserversorgung bei einwandfreier Wasserqualität müssen die Multifunktionalität für Mensch und Ökosysteme berücksichtigen und diese ausbalancieren.

Wasser ist ein knappes Gemeinschaftsgut und eine lebensnotwendige Ressource und muss daher sozial ausgewogen

verteilt und vorausschauend gemanagt werden. Aus der Anerkennung von Wasser als Gemeinschaftsgut ergibt sich eine staatliche Verantwortung, die Lasten der Verknappung von Wasser und Verschlechterung von Wasserqualität unter den gesellschaftlichen Gruppen sozial ausgewogen zu verteilen, unter Sicherung der Eigenschaften und Funktionalität der betroffenen Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen. Die Verteilung von Wasser und die Erhaltung und Schaffung von Wasserspeichern müssen den Bedarf aller Menschen und der Natur sowie die globalen Wechselwirkungen über den Wasserkreislauf adäquat berücksichtigen (One Water). Dies setzt gegebenenfalls bei einem angespannten Wasserdargebot voraus, den Umfang bisheriger oder beabsichtigter Nutzungen sowie den Wasserbedarf der Natur in einer Region zu prüfen und zunächst die Frage zu beantworten, inwieweit lebensnotwendige Mindestbedarfe des Menschen gedeckt werden können. Andere Nutzungen sollten mit Blick auf ihre Gesamtwirkung abgewogen und entweder effizienter gestaltet und Wasserentnahmen wo möglich durch alternative Ressourcen substituiert werden, z. B. durch Regenwassernutzung, Wasserwiederverwendung, oder im Extremfall nicht länger praktiziert werden.

Verschärfungen im Wassersektor und regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension können sich sehr unterschiedlich auf soziale Gruppen und Gesellschaften auswirken. Die Fähigkeit zur Krisenbewältigung ist am geringsten unter von Armut betroffenen und vulnerablen Gruppen vor allem in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens. Diese Fähigkeit ist jedoch auch bei einem bestehenden Missmanagement im Wassersektor unabhängig von den wirtschaftlichen Verhältnissen eingeschränkt. Viele regionale Wassernotlagen zeichnen sich zudem durch eine räumliche Diskrepanz zwischen Verursachern und Betroffenen aus, wodurch Kausalketten nicht immer offensichtlich sind. Verursacher tragen häufig nicht die Last der Kosten wasserschädlichen Handelns. Zugleich verfügen viele Betroffene nicht über einen Zugang zu technologischen und für Steuerung und Anpassung notwendigen Infrastrukturen für rechtzeitige Krisenprävention und -vorsorge.

5.2.2

Anpassungsfähigkeit angesichts fortlaufender Veränderungen steigern

Systeme zur Bereitstellung und Nutzung von Wasser sollten angesichts bisher ungekannter Schwankungen und nicht genau prognostizierbarer, fortlaufender Veränderungen resilient erhalten und wissenschaftsbasiert neu aufeinander abgestimmt werden. Verwaltungen, Betreiber und Nutzer müssen sich auf eine hohe Dynamik einstellen. Dafür müssen Strukturen sowie Planungs- und

Entscheidungsprozesse akteursübergreifend, anpassungsfähig und korrigierbar gestaltet sein.

Die Annahme von Stationarität, also die Vorstellung, dass natürliche Systeme auf der Grundlage empirischer Beobachtungen innerhalb eines definierten Zeitfensters eine vorhersagbare Variabilität aufweisen, ist nicht mehr tragfähig. Die bisher als stationär angesehenen Muster des Wasserhaushalts mit saisonal innerhalb bekannter Bereiche schwankenden Niederschlägen, Verdunstungsraten, Grundwasserständen und Flusspegeln, verändern sich durch menschliche Eingriffe und Klimaveränderungen in z. T. kurzen Zeiträumen und fortlaufend, was zu einer wachsenden Planungsunsicherheit führt (Milly et al., 2008; Kap. 4). Dies wird als Verlust der Stationarität bezeichnet.

Aufgrund der Trägheiten des Erdsystems werden diese Veränderungen für lange Zeit andauern, selbst wenn der Klimawandel und die Degradation von Ökosystemen gestoppt würden, und ihre Ausprägungen sind zumindest lokal nicht immer genau vorhersagbar (Caretta et al., 2022; IPBES, 2018a). Daher können Wassersysteme für betroffene Sektoren nicht mehr unter der Annahme einer Stationarität für die absehbare Zukunft geplant und bewirtschaftet werden, sondern müssen mit ausreichenden Puffern, Reserven und Flexibilität und insbesondere im Zusammenspiel mit der Natur resilient gehalten und laufend an die Veränderungen und aneinander angepasst werden. Notwendig ist ein langfristig orientierter, adaptiver und reversibler Wassermanagementansatz, dessen Umsetzung hilft, Interessenlagen und Pfadabhängigkeiten bei Wasserinfrastrukturprojekten, Nutzungsmustern, rechtlichen Regelungen, Institutionen und Abkommen transparent zu machen und politische Lösungen zu finden.

5.2.3

Resilienz und Risikovorsorge statt Gefahrenabwehr

Für die Sicherung einer klimaresilienten Wasserinfrastruktur und der Wasserqualität muss das Vorsorgeprinzip konsequent angewendet werden. Risikovorsorge und Risikominimierung statt Gefahrenabwehr sollten Grundlage von Planungsprozessen und Entscheidungen im gesamten Wassersektor und davon beeinflussten Sektoren sein.

Risikovorsorge und Risikominimierung müssen Grundlage von Planungsprozessen im gesamten Wassersektor sein – auch dort, wo bisher die Gefahrenabwehr im Vordergrund stand. Es bedarf einer Planung, die auf einer umfangreichen Risikocharakterisierung beruht und auf deren Grundlage Risiken angemessen gemanagt werden, um mit wachsenden Verschärfungen im Wasserbereich und

mit Unsicherheiten bei der Errichtung oder Anpassung von Wasserinfrastruktur umzugehen. Für die Sicherung einer klimaresilienten Wasserinfrastruktur und der Wasserqualität müssen die zu ergreifenden Maßnahmen an Resilienz und Vorsorge orientiert sein.

5.2.4

Blaues und grünes Wasser sektorübergreifend bewirtschaften

Blaues und grünes Wasser müssen bei regionalen und lokalen Lösungsansätzen gemeinsam und sektorübergreifend berücksichtigt und bewirtschaftet werden. Beide besitzen strategische, geopolitische Relevanz: Neben Flusseinzugsgebieten müssen auch grenzüberschreitende Verdunstungs- und Niederschlagsmuster berücksichtigt werden. Kohärenz zwischen Politikebenen und -feldern ist hierfür Voraussetzung.

Eine ausbalancierte Berücksichtigung der lebenswichtigen Ressource Wasser für Mensch und Natur für eine bestimmte Region setzt ein adäquates Verständnis der Rolle von grünem und blauem Wasser voraus. Dies erfordert eine gute Kenntnis von verfügbaren Dargeboten, Wasserbedarfen und Wasserqualitäten.

Auf regionaler Ebene kann eine aktive Bewirtschaftung des grünen Wassers bei der (Wieder-)Herstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts und einer wasserbewussten Siedlungsentwicklung stabilisierend auf den natürlichen Wasserhaushalt und die Biodiversität wirken, z. B. durch Maßnahmen wie Entsiegelung, Wiederaufforstung oder Bodenbedeckung zur Reduktion von Verdunstung und Verbesserung der Bodenfeuchte. Angesichts der zunehmenden Variabilität der Verfügbarkeit von Wasser zählt die Stärkung von Puffern in der Landschaft, die Wasser aufnehmen, zurückhalten und wieder abgeben können, zu den wichtigsten Vorsorge- und Reaktionsstrategien. Der Einsatz von blauem Wasser kann darüber hinaus den lokalen und regionalen natürlichen Wasserhaushalt stützen, z. B. durch gezielte Regenwasserinfiltration oder künstliche Grundwasseranreicherung mit Flusswasser oder wiederverwendetem Wasser. Dies schafft Resilienz gegenüber Extremen wie langanhaltenden Trockenphasen.

Auf der internationalen und nationalen Ebene bedeutet dies, die Wirkungen von großtechnischen Infrastrukturprojekten (z. B. Staudämme, Aquädukte), von Geoengineering (z. B. Wolkenimpfung) sowie von großräumigen Bewässerungsvorhaben und Landnutzungsänderungen mit gegebenenfalls grenzüberschreitenden Auswirkungen auf Verdunstung und Niederschlag abzuschätzen und nachteilige Auswirkungen auf grünes und blaues Wasser zu minimieren.

5.2.5

Wissenschaftsbasierten Diskurs über Probleme und Handlungsoptionen ermöglichen

Der WBGU empfiehlt, einen wissenschaftsbasierten Diskurs über Strategieentwicklung und Handlungsoptionen bei Unsicherheiten zu initiieren und Bedenken von Bürger:innen und Stakeholdern zu berücksichtigen. Dazu müssen Ausmaß und Dynamiken von Verschärfungen wasserbezogener Probleme und daraus resultierende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, verstanden und Handlungsoptionen erforscht werden. Wissenschaft sollte die Politik kontinuierlich informieren und eine starke beratende Rolle einnehmen, z. B. durch ein wissenschaftliches Monitoring eingesetzter Instrumente. Politische und gesellschaftliche Teilhabe, Bildung und Kooperation sollten gefördert werden.

Zum potenziellen Ausmaß, der regionalen Verteilung und der Bandbreite von Verschärfungen im Wassersektor und Grenzen der Beherrschbarkeit von Wassernotlagen steht die Forschung noch am Anfang. Auch zum Umgang mit Unsicherheiten und zur Verankerung langfristiger, potenziell kritischer Entwicklungen in heutigen Entscheidungen (Politik, Planung, Vorbeugung) besteht Forschungsbedarf. Zuverlässige Projektionen und regionalspezifische Modellierungen sind notwendig, um das Verständnis über die langfristigen Dynamiken zu verbessern, damit verbundene Risiken zu mindern sowie proaktives und gestaltendes Handeln zu gewährleisten – auch im Umgang mit Unsicherheiten (Kap. 3, 4).

Es sollte ein Diskurs ermöglicht werden, der gemeinsam von Gesellschaft, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik geführt wird. Hierbei könnten u. a. folgende Fragen diskutiert werden: Mit welchen Risiken in Bezug auf Wasserverfügbarkeit und ihre Kontinuität, Wasserqualität sowie Auswirkungen von Extremereignissen können, wollen oder müssen wir zukünftig leben? Was können wir tun um solche, die nicht tolerierbar sind oder sein werden, zu vermeiden? Wie halten wir einen möglichst großen „Sicherheitsabstand“ zu den Grenzbereichen, die von zunehmend schwindenden Handlungsspielräumen geprägt sind? Was gilt es unbedingt zu vermeiden, insbesondere mit Blick auf einen Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten? Welche Veränderungen können wir akzeptieren und welche können wir noch gestalten, im Wassersektor und darüber hinaus? Wie gelingt es uns, die Handlungsfähigkeit im Umgang mit wasserbezogenen Risiken so zu erhalten, dass wir proaktiv und gestaltend – statt reaktiv – handeln können?

5.2.6

Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen

Die Politik, öffentliche Institutionen, Unternehmen und Finanzmärkte sollten den Wert von Wasser und den systemischen Charakter von Wasserrisiken in ihren Entscheidungen erfassen und integrieren. Wirtschaftliche Entscheidungen müssen mit den langfristigen Zielen eines nachhaltigen Wassermanagements kompatibel sein.

Der Wert blauer und grüner Wasserressourcen für Mensch und Natur sowie die Größenordnung wasserbezogener Risiken müssen für Politik und Öffentlichkeit sowie Unternehmen und Investoren erfasst und transparent gemacht werden. Sowohl bei kurzfristigen Nutzungs- als auch bei langfristigen Investitionsentscheidungen sollten Knappheiten und Risiken berücksichtigt, Nutzungen priorisiert und Effizienzsteigerungen gefördert werden. Dies erfordert, dass bei allen Eingriffen in den Wasserhaushalt der Wert von Wasser für Mensch und Natur adäquat berücksichtigt wird, z. B. bei Landnutzungsänderungen, Baumaßnahmen oder Wasserentnahmen und -nutzungen bzw. der Vergabe entsprechender Rechte, öffentlichen Planungen sowie bei privatem Investitions- und Nutzungsverhalten. Dieser sollte gegebenenfalls durch Berichtspflichten, Wasserpreise, Verschmutzungsgebühren oder Zahlungen für Ausgleichsmaßnahmen sichtbar gemacht werden. Gestaffelte Wassertarife oder gezielte Unterstützungsmaßnahmen, z. B. aus umgewidmeten schädlichen Subventionen, sollten es allen Menschen ermöglichen, ihren Grundbedarf an Wasser zu decken. Um Investitionen in den Wassersektor mit Blick auf mögliche wasserbezogene Verschärfungen adäquat zu planen, effizient umzusetzen, stabile Einnahmen zu generieren und so auch attraktiver zu machen, müssen auch die Kapazitäten bei Wasserversorgern und Regulierern verbessert werden, z. B. für Planung und rechenschaftspflichtige Umsetzung von Investitionen sowie das Erfassen bzw. Sanktionieren von Entnahmen und Verschmutzung. Darüber hinaus sollten öffentliche und private Investitionsentscheidungen vor allem bei langlebigen Infrastrukturen wachsende Schadens- und Wertverlustrisiken berücksichtigen (stranded assets). Ein wichtiges Kriterium sollten neben vermiedenen Schäden auch die Kosten zukünftig gegebenenfalls notwendiger Anpassungen sein. Dies erfordert kürzere Revisionsfristen sowie eine gewisse Fehlerfreundlichkeit und die Bereitschaft, gewählte Lösungen unter Umständen erneut zu korrigieren und anzupassen.

5.2.7

Umsetzung beschleunigen – Selbstorganisation fordern und fördern

Der regulatorische Rahmen und alle Instrumente des Wassermanagements müssen eine beschleunigte Umsetzung ermöglichen und informelle, dezentrale Governancestrukturen einbinden, wo dies sinnvoll ist. Insbesondere bedarf es der Einbindung und Ertüchtigung nichtstaatlicher, selbstorganisierter Akteure.

Eine effektive Umsetzungsgovernance benötigt angemessen skalierte, regional angepasste institutionelle, technische und individuelle Kapazitäten sowie Steuerungskompetenzen. Allerdings sind formelle Governancekapazitäten selbst in Hocheinkommensländern häufig nicht hinreichend entwickelt oder umfangreich genug, woraus Planungs- und Umsetzungsmängel bzw. Vollzugsdefizite in der Regulierung resultieren. Angesichts der Dringlichkeit eines zielgerichteten Handelns für die Umsetzung einer Wasserregulierung bedarf es eines Zusammenspiels eines rahmengebenden gestaltenden Staates und schon praktizierten, historisch gewachsenen Strukturen der Selbstorganisation für eine verbesserte, beschleunigte Umsetzung. Dabei sollten auch selbstorganisierte Governancestrukturen berücksichtigt und wo angemessen entsprechend mit der formellen Governance verknüpft und eingebunden werden (Kap. 8.2).

5.3

Jenseits der Grenzen

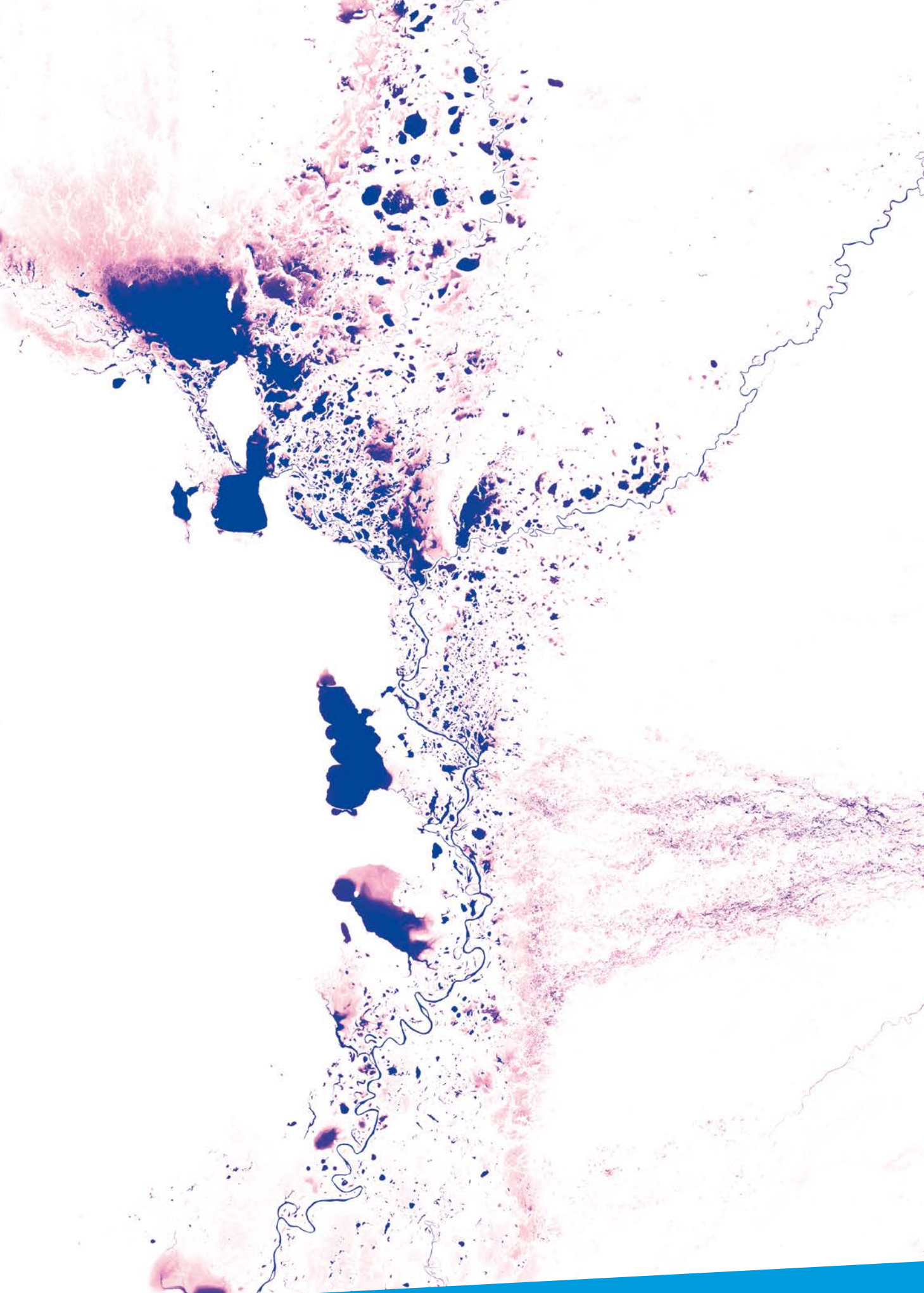
Um einen Übergang zu nicht beherrschbaren Situationen zu vermeiden, müssen rechtzeitig Anpassungsstrategien entwickelt werden. Bei einem Business-as-Usual-Szenario, d. h. ohne entschiedenes Gegensteuern, verengen sich die Handlungsspielräume im Umgang mit wasserbezogenen Risiken zunehmend (Abb. 5.1-1): Auch in äußersten Fällen wie einem Zusammenbruch der lokalen Wasserversorgung bestehen noch Handlungsmöglichkeiten, allerdings sind diese zunehmend reaktiv (z. B. Flucht). Ein proaktives, gestaltendes Handeln zur Vermeidung bzw. Abmilderung regionaler Wassernotlagen ist in vielen Fällen dann nicht mehr möglich. Anpassungsstrategien sollten also so gewählt werden, dass Fehlanpassungen vermieden werden und proaktives und gestaltendes Handeln möglich bleibt.

Nach Ausschöpfung aller Anpassungsoptionen (Kasten 5.1-1) müssen gegebenenfalls rechtzeitig Entscheidungen für einen geordneten Rückzug getroffen werden. Dies betrifft alle Politikbereiche, insbesondere auch außerhalb des Wassersektors. Dafür muss in der Politik und Gesellschaft diskutiert werden, wie Risiken abgesichert werden

sollen: Was wird privat versichert, wo springt der Staat ein, wo nicht mehr, und wie kann ein vorausschauender Infrastrukturrückbau erfolgen? Gegebenenfalls muss geprüft werden, welche Optionen und Handlungsbedarfe es für eine geordnete Migration zwischen und vor allem innerhalb von Ländern gibt. Mit Blick auf die Verfügbarkeit von Wasser für unterschiedliche Bedarfe sind die Grenzen der Anpassung in einer Region etwa dann erreicht, wenn

- die Bewohnbarkeit eines Ortes bzw. einer Region durch Wassermangel zunehmend limitiert ist und Zuzug nur beschränkt oder nicht mehr möglich ist;
- die landwirtschaftliche Produktion durch Dürren und saisonalen Wassermangel durch verringerte Gletscherabflüsse bedroht wird und damit die Existenzgrundlage einer potenziell sehr großen Zahl von Menschen in Frage steht;
- sich Wasserverschmutzung in Oberflächengewässern und Salzwasserintrusion in das Grundwasser gesundheitsgefährdend auf die Bevölkerung und negativ auf die Ökosysteme einer Region auswirken;
- die auf Wasserkraft basierende Energieversorgung einer Region durch (saisonalen) Wassermangel destabilisiert ist;
- durch Extremereignisse (Dürren und Überflutungen) gesellschaftliche Destabilisierungen eintreten, die die Fähigkeit zur Krisenbewältigung erheblich einschränken.

Eine durch solche Umstände erzwungene Abwanderung bzw. Flucht kann mit einer massiven Minderung von Lebensqualität verbunden sein, z. B. dem Verlust ökonomischer Lebensgrundlagen, kultureller Identität und sozialer Bindungen. Die Konsequenz wäre ein dauerhafter Verlust des gewohnten Lebensumfelds. Erschwerend kann hinzukommen, dass benachbarte Zielregionen der Einwanderung selbst bereits durch Wassernotlagen unter Druck stehen (Kap. 4). Dabei müssen auch Nutzungskonflikte im Auge behalten werden. Tritt eine regionale Wasserkrise dennoch ein, spielen Katastrophenvorsorge und -management eine zentrale Rolle. Dazu müssen in gefährdeten Regionen frühzeitig Notfallpläne und Nothilfeprogramme vorbereitet und finanziell unterlegt werden. Dies gilt insbesondere für Länder niedrigen und mittleren Einkommens. Zudem sollten Strategien zur Krisenkommunikation vorbereitet sowie mögliche Zielregionen zur temporären oder dauerhaften Unterbringung der direkt von einer Wassernotlage Betroffenen identifiziert werden.



Notwendig ist ein klimaresilientes Wassermanagement mit langfristigem Blick, das blaues und grünes Wasser zusammendenkt und flexibel auf Veränderungen reagieren kann. Es sollte Mehrgewinne beachten und nicht intendierte Konsequenzen vermeiden. Ziel ist die flächendeckende Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts. Zentrale Lösungsansätze sind (1) die Renaturierung wasserbezogener Ökosysteme, z. B. Fluss- und Auenlandschaften oder Moore, (2) Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte in der Landwirtschaft sowie (3) eine wassersensible Stadtentwicklung.

Die bestehende Übernutzung der Wasserressourcen, die ungleiche Verteilung von Wasser, der Verlust von Ökosystemleistungen sowie Gesundheitsrisiken, die mit Wasser in Zusammenhang stehen, sind vielerorts maßgeblich durch ein fehlgeleitetes und ineffektives Wassermanagement mitverursacht (Kap. 2–4). In Zukunft ist mit dauerhaft fortschreitenden, beschleunigten Änderungen im globalen Wasserkreislauf zu rechnen, die diese Herausforderungen deutlich verschärfen werden. Daher sind proaktive, wirkungsvollere und transformative Anpassungsmaßnahmen nötig, um angesichts der zunehmenden wasserbezogenen Verschärfungen (Kap. 3) einen sicheren Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit zu halten und das Eintreten regionaler Wassernotlagen zu vermeiden, die eine planetare Dimension erreichen können (Kap. 4, 5.1).

Weder das in vielen Regionen dysfunktionale Wassermanagement noch Managementansätze, die auf die Überwindung von Missständen und Fehlstellen abzielen, wie der etablierte Integrated-Water-Resources-Management-Ansatz (IWRM; Kap. 2.4.1.1), werden den Anforderungen durch den Klimawandel bisher gerecht (Kap. 2.4.4; Dörendahl und Aich, 2021; Giupponi und Gain, 2017; Ludwig et al., 2014; Mendoza et al., 2018; Noureddine et al., 2021). Ihre Weiterentwicklung ist aus Sicht des WBGU dringend erforderlich, denn nur wenn Wassermanagement klimaresilient ist, kann es seiner Schlüsselrolle bei der Klimawandelanpassung, als Baustein einer klimaresilienten Entwicklung (IPCC, 2022b:

2769 ff.), dem Schutz von Ökosystemen sowie bei der Aushandlung und Überwindung von Ziel- und Nutzungskonflikten im Wasserbereich gerecht werden. Zugleich kann eine stärkere und besser koordinierte Verzahnung von IWRM, Ökosystemschutz und Klimawandelanpassung dazu beitragen, Synergien zu schaffen, etwa indem zur Verfügung stehende Ressourcen effizienter eingesetzt und bereits etablierte multisektorale Strukturen genutzt werden (Dörendahl und Aich, 2021; Jimenez und Bray, 2022; UNEP, 2022; de Ruyter van Steveninck et al., 2018).

Um Impulse für die Weiterentwicklung bestehender Managementansätze und für die stärkere Umsetzung transformativer Anpassung im Wassersektor zu setzen, werden in diesem Kapitel die Grundzüge eines klimaresilienten Wassermanagements dargestellt, wie es aus Sicht des WBGU im Kontext der wasserbezogenen Verschärfungen und angesichts der Grenzen der Beherrschbarkeit erforderlich ist. Aufbauend auf bestehenden Ansätzen klimaresilienten Wassermanagements (z. B. BMUV, 2023b; World Bank, 2023b; GCEW, 2023b) wird in Kap. 6.1 dargelegt, wie ein Umgang mit wasserbezogenen Verschärfungen und Notlagen gelingen kann. Hierzu werden auch vier Anforderungen an die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung konkreter Maßnahmen vorgeschlagen. In Kap. 6.2–6.4 werden spezifische Problemlagen, Herausforderungen und Transformationsnotwendigkeiten in Bezug auf die Renaturierung von Ökosystemen, in der Landwirtschaft sowie in Städten thematisiert und mögliche Lösungsansätze anhand von Praxisbeispielen illustriert.

6.1

Umgang mit Verschärfungen und Notlagen

Die Verschärfungen im Wassersektor erfordern ein vorausschauendes, systemisches und anpassungsfähiges Management lokaler, regionaler und globaler Wasserkreisläufe, das die Multifunktionalität von Wasser langfristig erhält und dazu beiträgt, einen sicheren Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit zu halten. Neben wirkungsvollen Infrastrukturmaßnahmen sowie der Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts zeichnet sich ein klimaresilientes Wassermanagement durch Handlungspraktiken aus, die den Verlust der Stationarität anerkennen und in übergreifende Transformationsstrategien eingebettet sind. Dies umfasst eine Steuerung durch Zulassung, Planung und Betrieb, die Entscheiden unter Unsicherheit ermöglicht und die gesellschaftlichen Einflussfaktoren auf Wasserkreisläufe berücksichtigt.

Ein klimaresilientes Wassermanagement beruht auf transdisziplinären und kollaborativen Lern- und Entscheidungsprozessen über Sektoren und räumliche Skalen hinweg und bezieht empirische Daten, Echtzeitinformationen und Zukunftsprojektionen unter verschiedenen Szenarien ein. Es orientiert sich an demokratisch ausgehandelten Zielen, Werten, Prinzipien und Regeln. Als Grundlage für diesen Aushandlungsprozess schlägt der WBGU die in Kap. 5.2 dargestellten Handlungsprinzipien vor. In Kap. 6.1.1 wird beispielhaft dargestellt, wie diese umgesetzt werden können.

Für die Etablierung eines klimaresilienten Wassermanagements existieren schon heute zahlreiche Maßnahmen, die kontextspezifisch ausgewählt und miteinander kombiniert werden können. Die konkrete Umsetzung hängt von den lokalen naturräumlichen und gesellschaftlichen Gegebenheiten ab, welche das Wasserdargebot und die Wassernachfrage bestimmen. Zugleich bedarf es der zielgerichteten Entwicklung neuer Maßnahmen, die den beschriebenen Verschärfungen im Wassersektor kurz- und langfristig gerecht werden können (Kap. 3). Für die Entwicklung, die Auswahl und Kombination, die Etablierung sowie gegebenenfalls den Betrieb bzw. die Aufrechterhaltung von Maßnahmen im Rahmen eines klimaresilienten Wassermanagements schlägt der WBGU vier Anforderungen vor, in denen sich die übergreifenden Handlungsprinzipien widerspiegeln und die stets berücksichtigt werden sollten (Kasten 6.1-1; Kap. 6.1.2). Sie müssen sich auch in Budget- und Kompetenzzuweisungen niederschlagen.

Wie schnell und umfassend die beschriebene Vision eines klimaresilienten Wassermanagements regional bereits realisiert wird und künftig realisiert werden kann, wird u. a. von übergeordneten Rahmenbedingungen

bestimmt. Dazu gehören z. B. die Verfügbarkeit von Finanzmitteln, Technologien und Fachpersonal, die Ausgestaltung der Governance sowie die gesellschaftliche Akzeptanz von Maßnahmen (Kap. 6.1.2.2; Kap. 8). Um transformative Anpassung (Kasten 5.1-1) zu befördern, sollten Umsetzungshindernisse und mit diesen verbundene Machtdynamiken identifiziert und überwunden werden. Gelegenheitsfenster sollten genutzt werden, z. B. der Wiederaufbau nach Extremereignissen oder großräumige Infrastrukturmaßnahmen in Städten. Zudem können unkonventionelle und innovative Lösungswege in besonders geförderten Reallaboren ausgelotet und erfolgreiche Praxisbeispiele und Praktiken beschleunigt institutionalisiert und verbreitet werden (Fedele et al., 2019).

Kurz- wie langfristig gilt es, Fehlanpassung (maladaptation) im Wassermanagement zu vermeiden. Fehlanpassung meint „aktuelle oder mögliche negative Folgen von Anpassungsmaßnahmen, welche die Vulnerabilität oder Exposition eines Systems, Sektors oder einer Bevölkerungsgruppe verstärken oder verschieben oder eine nachhaltige Entwicklung beeinträchtigen“ (Reckien et al., 2023; Abb. 6.1-1). Die Vermeidung von Fehlanpassung erfordert eine kritische Auseinandersetzung mit den komplexen Ursachen von Vulnerabilität, eine differenzierte und kontextspezifische Konzeptualisierung und Messung des Anpassungserfolgs sowie Planung, Maßnahmenumsetzung und Lernprozesse gemeinsam und auf Augenhöhe mit betroffenen Bevölkerungs- und Akteursgruppen (Eriksen et al., 2021; Schipper, 2020). Hierfür sind ein intersektionaler Ansatz, der die Ursachen sich überschneidender Vulnerabilitätsfaktoren kritisch hinterfragt, und Adaptivität im Wassermanagement entscheidende Voraussetzungen (Eriksen et al., 2021; Erwin et al., 2021; Fröhlich et al., 2018; Thompson-Hall et al., 2016). Zur Vermeidung von Fehlanpassung besteht gleichwohl dringend weiterer Forschungsbedarf.

6.1.1

Umsetzung der Handlungsprinzipien eines klimaresilienten Wassermanagements

Als Grundlage für den demokratischen Aushandlungsprozess für die Ziele, Werte, Prinzipien und Regeln eines klimaresilienten Wassermanagements schlägt der WBGU die in Kap. 5.2 dargestellten Handlungsprinzipien vor. Im Folgenden wird beispielhaft dargestellt, wie diese umgesetzt werden können.

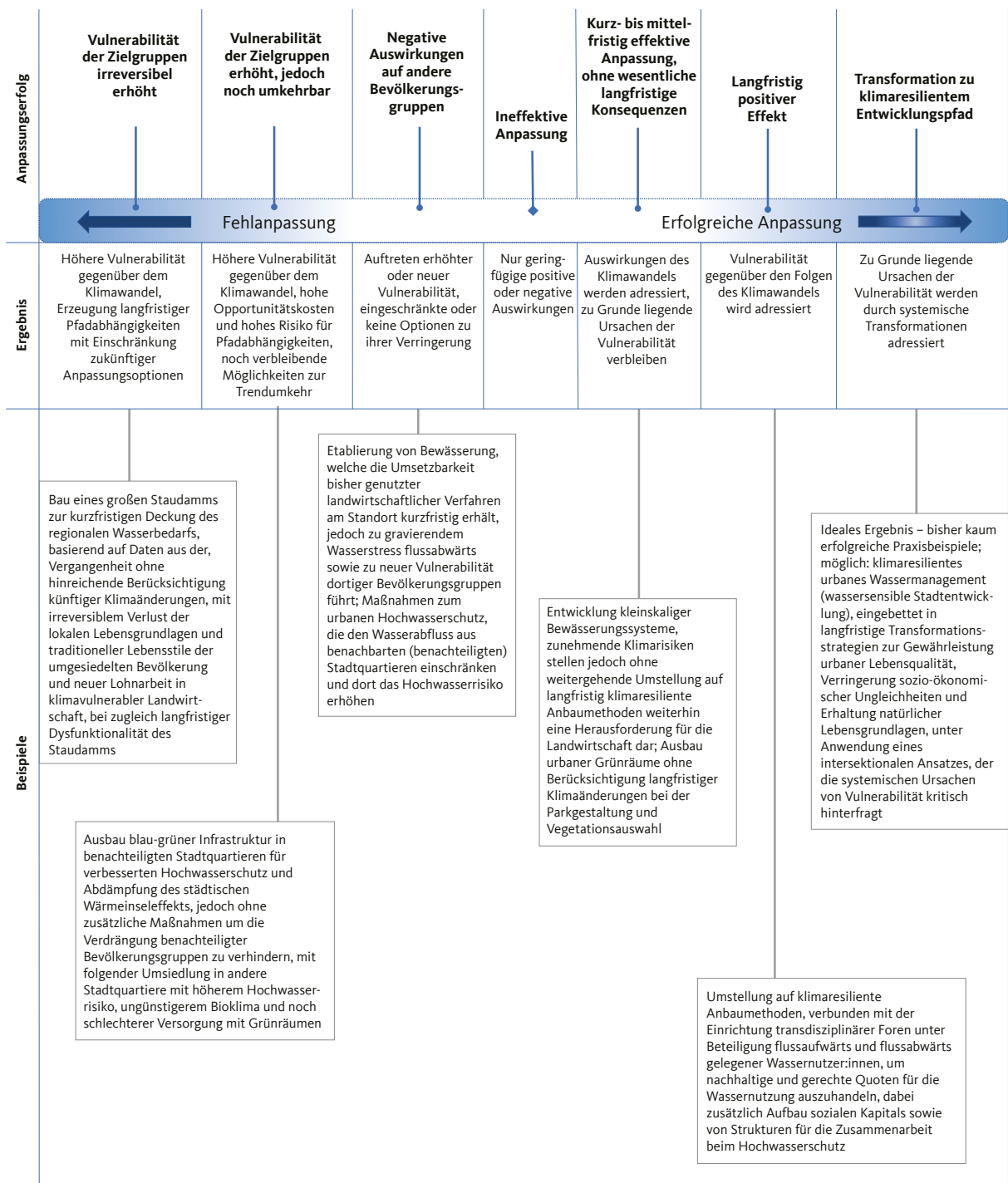


Abbildung 6.1-1

Kontinuum zwischen Fehlanspassung (links) bis hin zu transformativer Anpassung (rechts) mit Beispielen für wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen. Der Anpassungserfolg ist zeitlich und kontextspezifisch variabel und verschiedene Kriterien und Dimensionen sind für die Beurteilung entscheidend, z. B. die Auswirkungen auf benachteiligte Bevölkerungsgruppen und der Beitrag zu systemischen Veränderungen (Reckien et al., 2023).

Quelle: basierend auf Schipper, 2020; Beispiele: Ergänzung WBGU

Kasten 6.1-1**Auf einen Blick: Vier Anforderungen, die bei der Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zu beachten sind**

1. *Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen:* Die Wirksamkeit von Maßnahmen sollte im Hinblick auf spezifische wasserbezogene Ziele und in jedem Fall bezüglich ihres Beitrags für die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts beurteilt werden. Vor dem Hintergrund der wasserbezogenen Verschärfungen müssen verschiedene Zeithorizonte, Unsicherheiten und Wirkungsverzögerungen sowie Anpassungsgrenzen Bestandteil der Beurteilung sein.

2. *Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext:* Die Machbarkeit von Maßnahmen sollte kontextspezifisch unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Technologien, finanziellen

Mitteln, institutionellen Kapazitäten, ihrer Akzeptanz sowie ihres Flächen- und Ressourcenbedarfs beurteilt werden – auch im Hinblick auf ihren langfristigen Betrieb und ihre möglicherweise im Zeitverlauf nötige Anpassung.

3. *Stärkerer Fokus auf mögliche Mehrgewinne:* Mögliche Mehrgewinne für Klima- und Biodiversitätsschutz und Gesundheit, soziale und wirtschaftliche Vorteile sowie Effekte auf die Verringerung von Ungleichheiten sollten antizipiert, evaluiert und bei der Beurteilung von Maßnahmen berücksichtigt werden.

4. *Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen:* Um Fehlanpassung und weitere nicht intendierte wasserbezogene, ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Konsequenzen zu vermeiden, sollten möglichst alle Auswirkungen von Maßnahmen durch einen systemischen und transdisziplinären Ansatz identifiziert, evaluiert und berücksichtigt werden.

Die vier Anforderungen werden in Kap. 6.1.2 näher erläutert.

Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur sicherstellen

Das Wassermanagement sollte darauf abzielen, alle Funktionen von Wasser und somit den Bedarf aller Menschen und der Natur adäquat zu berücksichtigen (Kap. 5.2.1). Auf konzeptioneller Ebene können verschiedene, miteinander interagierende Gerechtigkeitsdimensionen Orientierung bieten, z. B. intra- und intergenerationelle sowie Interspezies-Gerechtigkeit im Rahmen eines stabilen Erdsystems, welche die Säulen des von Gupta et al. (2023) vorgeschlagenen übergreifenden Konzepts der Erdsystemgerechtigkeit darstellen.

Auf Umsetzungsebene kann eine Integration von Ansätzen der ökosystembasierten Anpassung (Ecosystem-based Adaptation, EbA) ins Wassermanagement, z. B. durch eine Verzahnung mit dem IWRM-Ansatz, hilfreich sein, um Wasserfunktionen für Ökosysteme gezielt zu adressieren und so Ökosystemleistungen zu unterstützen (Dörendahl und Aich, 2021). Der Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus-Ansatz (Kap. 2.4.1.3) kann genutzt werden, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Wasser, Energie, Ernährungssystemen und Ökosystemen sowie hydrologische, biologische, soziale und technologische Einflussfaktoren im lokalen Wassermanagement zu berücksichtigen. Die integrierte Nutzung verschiedener Ansätze hilft, Zielkonflikte zu identifizieren und zu überwinden sowie Mehrgewinne zu realisieren (IPCC, 2022b: 653).

Anpassungsfähigkeit angesichts fortlaufender Veränderungen steigern

Die Annahme von Stationarität, also die Vorstellung, dass natürliche Systeme auf der Grundlage empirischer

Beobachtungen innerhalb eines definierten Zeitfensters eine vorhersagbare Variabilität aufweisen, ist angesichts des fortschreitenden Klimawandels nicht mehr tragfähig. Um dem zunehmenden Verlust der Stationarität gerecht zu werden, müssen Strukturen und Prozesse für Planung und Entscheidung in der Wasserwirtschaft akteursübergreifend, anpassungsfähig und korrigierbar gestaltet sein (Kap. 5.2.2). Damit das Wassermanagement flexibler auf sich verändernde Rahmenbedingungen reagieren kann, muss eine Planung grundsätzlich zwei zeitliche Skalen berücksichtigen: Notwendig sind zum einen auf Grundlage von Gegenwartsdaten angepasste kurzfristige Infrastrukturmaßnahmen. Zum anderen bedarf es bei der Planung einer langfristigen Perspektive, die mindestens bis zum Jahr 2050 und, wo nötig, auch darüber hinaus reichen sollte. Klassische Infrastrukturansätze der Wasserwirtschaft, wie die Errichtung von Talsperren oder Fernwasserleitungen mit einer Realisierungs-, Nutzungs- und Abschreibungsdauer von mehreren Jahrzehnten, haben zwar langfristig Bestand, sind jedoch bisher oft nicht hinreichend adaptierbar gestaltet bzw. flexibel geplant. Eine vorausschauende Infrastrukturplanung muss die verschiedenen zeitlichen, räumlichen und systemischen Grenzen von Maßnahmen, zu erwartende Dynamiken sowie Planungsunsicherheiten berücksichtigen und integrieren (BMUV, 2023b: 50). Die Kombination verschiedener Maßnahmen aus dem gesamten Spektrum von rein technischen bis hin zu stärker naturbasierten Lösungen eröffnet die Möglichkeit, ihre jeweiligen Stärken zu nutzen und ihre Limitationen gezielt zu kompensieren.

Der fortschreitende Klimawandel, großräumige Landnutzungsänderungen, Veränderungen „atmosphärischer

Flüsse“ und übergreifende technologische Entwicklungen (z. B. Kühlwasserbedarfe im Zuge der steigenden Digitalisierung oder zusätzlicher Wasserbedarf im Rahmen der Energiewende; Kasten 7.4-2) resultieren in einer kontinuierlichen Veränderung der Wasserverfügbarkeit und des Wasserbedarfs. Als Reaktion bedarf es einer höheren Flexibilität in der Wassernachfrage sowie neuer Managementansätze, die das Wasserdargebot und alle Bedarfe vorab ermitteln, u. a. durch die Nutzung von Echtzeitdaten. Die gewählten Bewirtschaftungsmethoden müssen konstant überwacht, ihre Ergebnisse ausgewertet und gegebenenfalls kurzfristig angepasst werden. Dafür müssen infrastrukturelle Lösungen dezentraler, modularer und adaptiver gestaltet werden. Eine Reihe möglicher Maßnahmen im Rahmen der Renaturierung von Ökosystemen, in der Landwirtschaft sowie in Städten findet sich in den Kapiteln 6.2–6.4.

Resilienz und Risikovorsorge statt Gefahrenabwehr

Um im Sinne von Resilienz und Risikovorsorge (Kap. 5.2.3) eine stabile Wasserversorgung auch bei Extremereignissen und insbesondere langanhaltenden Trockenperioden sicherzustellen, ist unter anderem eine Diversifizierung von Wasserportfolios nötig. Für die Trinkwasserversorgung bedeutet dies, wo erforderlich, die Nutzung von voneinander unabhängigen blauen Wasserressourcen zu ermöglichen (z. B. Förderung aus unterschiedlichen Grundwasserleitern; Nutzung lokaler Grundwasserressourcen ergänzt um einen Anschluss an regionale Verbundnetze). Konventionelle Trinkwasserressourcen lassen sich zudem durch die Nutzung alternativer Frischwasserressourcen, etwa durch Wasserrecycling und Meerwasserentsalzung, substituieren und dadurch schonen. Mehrfachnutzungen lokaler und regionaler Wasserressourcen im Sinne von Wasserrecycling sollten generell stärker in den Blick genommen werden.

Blaues und grünes Wasser sektorübergreifend bewirtschaften

Angesichts der zunehmenden Variabilität der Wasserverfügbarkeit und zunehmender Wasserextreme spielt die Stärkung von Puffern in der Landschaft, die Wasser aufnehmen, zurückhalten und wieder abgeben können, im klimaresilienten Wassermanagement eine entscheidende Rolle – auf Flächen aller Nutzungsgrade (Kap. 5.2.4). Hierfür ist, zusätzlich zu natürlichen Blauwassersystemen, in der Wasserwirtschaft künftig die stärkere Berücksichtigung des in Böden und Pflanzen gespeicherten grünen Wassers (bezüglich Menge und Wirksamkeit) erforderlich. Grünes Wasser kann bis zu einem gewissen Grad Extremereignisse abpuffern. Ein lokales Wasserdargebot kann z. B. durch eine gezielte dezentrale Regenwassersammlung und -versickerung, welche die Bodenfeuchte und Grundwasserneubildung erhöht, stabilisiert werden.

Die flächendeckende Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts und die damit notwendige Umgestaltung der Flächennutzung im ländlichen Raum sowie in Städten ist das wichtigste, langfristige Ziel eines klimaresilienten Wassermanagements.

Wissenschaftsbasierten Diskurs über Probleme und Handlungsoptionen ermöglichen

Erforderlich ist auch ein wissenschaftsbasierter Diskurs über Strategieentwicklung und Handlungsoptionen bei Unsicherheiten (Kap. 5.2.5). Dieser kann das Wassermanagement informieren und durch dieses informiert werden. Auf Umsetzungsebene ist in einem klimaresilienten Wassermanagement der Einsatz differenzierter Ansätze und Instrumente zur Beurteilung und Bewertung von Wirksamkeit, Machbarkeit, Mehrgewinnen und nicht intendierten Konsequenzen von Maßnahmen essenziell, um eine systematische Abwägung von Alternativen angesichts dauerhafter Unsicherheit zu ermöglichen (Kap. 6.1.3). Beispiele für geeignete Methoden sind die Multikriterienanalyse unter Betonung von Mehrgewinnen (z. B. Alves et al., 2018a) und Ansätze, welche die Methode des „Decision Scaling“ nutzen, wie das Decision Tree Framework der Weltbank (Ray und Brown, 2015) und die Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA; Mendoza et al., 2018). Ihr Einsatz ermöglicht einen kollaborativen Prozess für eine risikobasierte Entscheidungsfindung, welcher eine Bottom-up-Analyse von Vulnerabilitäten sowie der Risiken von Maßnahmen mit Projektionen von Klimaänderungen und hydrologischen Veränderungen unter verschiedenen Szenarien verbindet (Kasten 6.1-2).

Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen

Der Wert blauer und grüner Wasserressourcen für Mensch und Natur sowie die Größenordnung wasserbezogener Risiken müssen erfasst und für Politik und Öffentlichkeit sowie Unternehmen und Investor:innen transparent gemacht werden (Kap. 5.2.6). Transparenz ist auch für die Finanzierung von Maßnahmen notwendig, denn angesichts knapper finanzieller Ressourcen und weiter zunehmender Finanzierungsbedarfe für verschiedenste Transformationsbereiche ist die Konkurrenz um Finanzmittel hoch. Vor dem Hintergrund dauerhafter Unsicherheiten müssen Finanzierungslösungen für lokal angepasste Maßnahmen gefunden werden, mit denen auch zukünftige, weitere Anpassungen von bereits umgesetzten Maßnahmen bei Bedarf möglich sind und Investitionen sowohl für öffentliche als auch private Investor:innen attraktiv sind. Zudem müssen bei Investitionsentscheidungen wachsende Schadens- und Wertverlustrisiken berücksichtigt werden. Insbesondere langfristig ausgelegte Großinfrastrukturprojekte wie der Bau von Staudämmen

oder Fernwasserleitungen binden Finanzmittel über lange Zeit und bergen die Gefahr „stranded assets“ zu werden, z. B. wenn Wasserknappheit einen Staudamm unrentabel werden lässt. Um private Investitionen zu mobilisieren und zu lenken, braucht es einen regulatorischen und fiskalischen Rahmen, innerhalb dessen Mehrgewinne entlohnt und nicht intendierte negative Konsequenzen bepreist werden. Diese und weitere Strategien für die Ausgestaltung von Finanzierungsansätzen sowie die notwendigen Rahmenbedingungen für Investitionsentscheidungen werden in Kap. 8.3 ausführlicher diskutiert.

Umsetzung beschleunigen – Selbstorganisation fördern und fördern

Klimaresilientes Wassermanagement braucht einen regulatorischen Rahmen und Instrumente, die eine beschleunigte Umsetzung ermöglichen und – wo sinnvoll – informelle, dezentrale Governancestrukturen einbinden (Kap. 5.2.7). Staatliche Steuerung sollte unter Einhaltung des Subsidiaritätsprinzips eingefordert und im Sinne eines gestaltenden Staates sichergestellt werden. Gleichzeitig obliegt es der staatlichen Verantwortung, nichtstaatliche, selbstorganisierte Akteure und Strukturen einzubinden und zu ertüchtigen sowie zivilgesellschaftliches Engagement für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen auf lokaler Ebene zu fördern und zu fordern. Ausgerichtet auf die Handlungsprinzipien eines klimaresilienten Wassermanagements gilt es, staatliche Steuerung und Selbstorganisation komplementär zueinander auszugestalten. Es bedarf langfristiger und infrastrukturabhängiger Planungszyklen, die gleichzeitig durch hohe Agilität und Flexibilität sowie kurzfristige Handlungsfähigkeit im Umgang mit plötzlichen und unerwarteten Verschiebungen in der Wasserverfügbarkeit geprägt sind. Die Effektivität der Maßnahmen sollte dabei durch eine wirkungs- und wirksamkeitsorientierte Governance sichergestellt werden. Gleichzeitig bedarf es hochgradig kontextspezifischer, pragmatischer Governance, die Mehrgewinne ermöglicht und gleichzeitig Risiken aufgrund nicht vorhersehbarer, nicht intendierter Konsequenzen minimiert. Konkret bedeutet dies, dass übergreifende Kommunikations- und Koordinationsmechanismen von hoher Bedeutung sind. Ein Austausch über unterschiedliche Sektoren bzw. Politikfelder hinweg ist dringend geboten und sollte auch nichtstaatliche Akteure einbeziehen. Partizipative Dialogforen können den Austausch zwischen staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren ermöglichen (Kap. 8.2.3). Standards für die Verteilung verfügbarer Wasserressourcen bedürfen der regelmäßigen Überprüfung. Die staatliche und nichtstaatliche Kooperation über Ländergrenzen hinweg, innerhalb von sowie zwischen Einzugsgebieten und entlang eines Ökosystemansatzes, ist für ein klimaresilientes Wassermanagement unerlässlich.

Der WBGU begrüßt die aktuellen Bestrebungen in Deutschland, das Leitbild der wassersensiblen Stadtentwicklung in das Baugesetzbuch aufzunehmen (Kap. 6.4.1) sowie die beabsichtigte Normierung der multifunktionalen Flächennutzung als neues Leitbild und als einen bei der Bauleitplanung zu beachtenden Abwägungsbelang (BMWSB, 2024: 9). Beide Änderungen des deutschen Baugesetzbuchs haben großes Potenzial, zur Umsetzung des in diesem Gutachten vorgeschlagenen klimaresilienten Wassermanagements beizutragen.

6.1.2

Vier Anforderungen an die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen

Für die Entwicklung, die Auswahl und Kombination, die Etablierung sowie gegebenenfalls den Betrieb bzw. die Aufrechterhaltung von Maßnahmen im Rahmen eines klimaresilienten Wassermanagements definiert der WBGU vier Anforderungen, in denen sich die übergreifenden Handlungsprinzipien spiegeln und die stets berücksichtigt werden sollten.

6.1.2.1

Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen

Die Wirksamkeit einer Maßnahme sollte im Hinblick auf ihre spezifischen wasserbezogenen Ziele und in jedem Fall hinsichtlich ihres Beitrags zur Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts beurteilt werden, dem wichtigsten, langfristigen Ziel eines klimaresilienten Wassermanagements (Kap. 6.1.1). Die Wirkung auf den Landschaftswasserhaushalt sollte nicht nur für Maßnahmen zur verbesserten Grundwasserneubildung oder Wiedervernässung, sondern auch für Maßnahmen zur Bereitstellung und Aufbereitung von Trinkwasser, zur Verbesserung der Qualität von Oberflächen- und Grundwasser oder zur Minimierung der Folgen von Sturzfluten, Hochwässern und Dürren beurteilt werden. Sie sollten etwa darauf geprüft werden, ob sie die Bodenfeuchte stabilisieren, Wasser länger in der Landschaft halten und so zur Schaffung natürlicher Puffer beitragen sowie ob sie die Resilienz von Wassersystemen erhalten oder steigern.

Die Wirksamkeit von Maßnahmen hängt u. a. von technischen Faktoren ab, wobei grob zwischen quantitativen Aspekten (z. B. in Bezug auf die Aufnahme, Speicherung und den Rückhalt von Wasser) und qualitativen Aspekten und ggf. Limitationen (z. B. in Bezug auf die Aufnahme, Akkumulation und Transformation von im Wasser befindlichen Stoffen) unterschieden werden kann. Während etwa durch Pflanzen- und Teichkläranlagen die organische Belastung aus häuslichen Abwässern in

der Regel entfernt werden kann, ist dies für Stoffe mit persistenten Stoffeigenschaften und Pathogene (Bakterien, Viren) nur bedingt möglich (Arden und Ma, 2018; Castellar et al., 2022). Durch Kombination verschiedener Maßnahmen können ihre jeweiligen Stärken genutzt und ihre Limitationen kompensiert werden (Beispiele zur effizienten Abwasserbehandlung: Kap. 7.1.2).

Weiterhin beeinflussen kontextuelle Einflussfaktoren, z. B. spezifische klimatische, raumordnerische, städtebauliche, ökologische und politische Rahmenbedingungen, die Wirksamkeit. Aufgrund der beschriebenen Verschärfungen im Wassersektor und insbesondere aufgrund des Verlusts der Stationarität verändern sich die wirkungsrelevanten Rahmenbedingungen. Die Wirksamkeit kann sich daher kontinuierlich verändern, ohne dass sie sich langfristig stabilisiert. Beispielsweise können in Folge von Klimaänderungen spezifische naturbasierte Lösungen lokal möglicherweise nicht mehr umgesetzt oder weniger wirksam werden. Einige konventionelle technische Maßnahmen wie Deiche, Stauseen und Entwässerungssysteme können in Folge häufigerer und intensiverer Extremereignisse überfordert, beschädigt und dysfunktional werden (UBA, 2023d).

Viele technische Infrastrukturen sind auf Grundlage historischer Daten zu den Wasserbedarfen sowie zum Wasserdargebot und der bisherigen Häufigkeit von Extremereignissen dimensioniert und nicht für kommende Klimaveränderungen ausgelegt. Beispielsweise wird für die Dimensionierung eines Hochwasserdeichs ein „Jahrhunderthochwasser“ (HQ_{100}) zugrunde gelegt. Es bezeichnet einen Hochwasserabfluss, der im statistischen Mittel nur einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird. Wie wahrscheinlich es ist, dass die Funktionsfähigkeit von Einrichtungen der Trinkwasserversorgung, Abwasserentsorgung (z. B. Kanalnetze, Kläranlagen) oder des Hochwasserschutzes durch die lokalen Auswirkungen des Klimawandels eingeschränkt wird, lässt sich anhand der heutigen Datenlage noch nicht belastbar bewerten. Fest steht jedoch, dass diesbezügliche Planungsunsicherheiten erheblich zunehmen werden. Klimaschutz und Maßnahmen zur Vermeidung von Verschmutzung sind daher von entscheidender Bedeutung, um Wasserqualität und Wassermenge zu bewahren (Kap. 5.1, 7).

Maßnahmen müssen außerdem grundsätzlich so geplant und ausgeführt werden, dass eine technische Anpassung an Folgen des Klimawandels (veränderte Niederschlagsmuster, Extremereignisse) während der Nutzungsdauer mit dem kleinstmöglichen Aufwand durchführbar ist. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Zeitskalen ist auch deshalb relevant, weil es zu erheblichen Verzögerungen zwischen dem Beginn der Maßnahmenumsetzung und der Entfaltung der erwünschten Auswirkungen kommen kann, z. B. nach dem Bau von Talsperren oder der Umgestaltung eines Kiefernmonokulturbestands in

einen Mischwald. Andere Maßnahmen können sogar eine kurzfristig negative Wirkung bei langfristig überwiegend positiver Wirkung besitzen. Beispielsweise kann eine durch lokale Wasserrückhaltmaßnahmen länger anhaltende Flächenvernässung die landwirtschaftliche Bearbeitung von Flächen kurzfristig einschränken. Sie wird sich aber letztlich positiv auf die Landwirtschaft auswirken, wenn sie den lokalen Wasserkreislauf langfristig stabilisiert.

Zeitverzögerungen können durch die Kombination kurz- und langfristig wirksamer Maßnahmen kompensiert werden. Beispielsweise können langwierige Maßnahmen der flächenwirksamen Umgestaltung hin zu einem klimaresilienten Landschaftswasserhaushalt, die sich zum Teil über mehrere Jahrzehnte strecken können, durch kurzfristige lokale Maßnahmen wie den Aufbau von Bewässerungssystemen in der Landwirtschaft ergänzt werden. Dabei sind kurzfristig wirksame Lösungen so zu gestalten, dass sie langfristig wirksame Lösungen möglichst wenig einschränken und keine unerwünschten Pfadabhängigkeiten geschaffen werden.

6.1.2.2

Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext

Ob die Etablierung und der Betrieb einer konkreten Infrastrukturmaßnahme lokal machbar sind, hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit von Technologien, finanziellen Mitteln und institutionellen Kapazitäten ab. Diese Faktoren sind kontextspezifisch variabel, können sich im Zeitverlauf verändern (z. B. durch geopolitische Verschärfungen; Kap. 3.2.2) und werden durch die Gestaltung der Governance mitbestimmt (Kap. 8). Zugleich variiert der Bedarf an spezifischem Wissen, finanziellen Mitteln und technischen Anlagen erheblich zwischen verschiedenen Maßnahmen – sowohl im Hinblick auf erforderliche Anfangsinvestitionen als auch hinsichtlich des längerfristigen Aufwands zur Funktionserhaltung und ggf. Anpassung an neue Entwicklungen. Um die hinreichende Adaptivität von umgesetzten Infrastrukturmaßnahmen sicherzustellen, müssen sich verändernde Rahmenbedingungen und Unsicherheiten bei der Beurteilung ihrer Machbarkeit daher von Beginn an berücksichtigt werden.

Dies gilt ebenso für den Flächen- und Ressourcenbedarf von Maßnahmen, der auch mit sonstigen Nutzungen und Schutzziele in Konflikt stehen kann. Dies könnte der Fall sein, wenn z. B. die Nutzung bestimmter Rohstoffe oder der Energieverbrauch insgesamt reduziert werden sollen oder langfristig zusätzliche Flächen für Landwirtschaft oder Klima- und Biodiversitätsschutz benötigt werden. Daher sollte stets auch beurteilt werden, ob und wie sich Maßnahmen zur Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts im Rahmen eines integrierten

Landschafts- und Wasserhaushaltsansatzes umsetzen lassen (Kap. 6.3; Kap. 6.5.3).

Der Flächen- und Ressourcenbedarf spielt auch für die Machbarkeit von Maßnahmen zur Wasserwiederverwendung eine Rolle. Beispielsweise ist der Flächenbedarf von Pflanzen- und Teichkläranlagen für dicht besiedelte urbane Räume vielfach zu hoch (Castellar et al., 2022; Boano et al., 2020) – sie eignen sich in der herkömmlichen Ausführung nur für ländliche Räume mit geringer Einwohner:innendichte und großer Flächenverfügbarkeit. Konventionelle technische Lösungen zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Abwässer haben hingegen zum Teil einen hohen Bedarf an Energie oder Chemikalien. Innovative technische Ansätze, um aus stark verschmutztem Wasser wieder „einwandfreies Trinkwasser“ (das gesetzlichen Vorgaben entspricht) zu machen, erfordern in der Regel viel Know-how und aufwändige Technik. Zusätzlich verlangen sie einen nochmals deutlich höheren Einsatz von Energie und speziellen Materialien (z. B. beschichtete Polymere, seltene Erden) oder generieren erhebliche Abfallströme (z. B. Konzentrate bei Membranfiltrationsverfahren).

Auch kann fehlende gesellschaftliche Akzeptanz bei manchen Maßnahmen die Machbarkeit einschränken, z. B. wenn in der Bevölkerung Vorbehalte bezüglich der Verwendung von „recyceltem Wasser“ für den Trinkwassergebrauch bestehen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, sind begleitende Maßnahmen denkbar. Etwa wurde die verstärkte Nutzung aufbereiteten Abwassers als Trinkwasser in Singapur zur Akzeptanzsteigerung mit einer großskaligen öffentlichen Aufklärungskampagne durch die Regierung begleitet (Duong und Saphores, 2015).

Zudem wird die Machbarkeit einer Maßnahme von der Bereitschaft beteiligter Akteur:innen zu ihrer Umsetzung bestimmt. In der Landwirtschaft etwa ist es wichtig, die Rolle von Landwirt:innen als Wasserakteur:innen politisch und gesellschaftlich wertzuschätzen und finanzielle Anreize zu setzen (Kap. 6.3.3). Die Machbarkeit und Effektivität derartiger begleitender Maßnahmen zur Steigerung von Akzeptanz und Umsetzungsbereitschaft sind wiederum kontextabhängig, was bei der Analyse der Machbarkeit einer Maßnahme ebenfalls mitgedacht werden sollte.

6.1.2.3

Stärkere Berücksichtigung möglicher Mehrgewinne

Maßnahmen sollten, wenn möglich, multifunktional ausgelegt sein. Das heißt, dass sie zum einen die verschiedenen Funktionen von Wasser für Menschen und Ökosysteme adressieren und zum anderen ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Mehrgewinne anstreben, die über wasserbezogene Wirkungen hinausgehen. Beispielsweise kann die Renaturierung

von Mooren und anderen Feuchtgebieten Biodiversität schützen und mehrfache Ökosystemleistungen bereitstellen (Kap. 6.2). Der Ausbau von Agroforstwirtschaft kann die lokale Ernährungssicherheit verbessern und die Lebensgrundlagen der Bevölkerung unterstützen (Rosenstock et al., 2019; Kap. 6.3). Der Ausbau blaugrüner Infrastruktur in Städten kann gesundheitliche und soziale Vorteile nach sich ziehen (Kap. 6.4). Besondere Potenziale bietet die stärkere Nutzung naturbasierter Maßnahmen, deren Mehrgewinne oft auf einer stärkeren Erhaltung regulierender Ökosystemleistungen (z. B. Verbesserung der Wasserqualität) bei gleichzeitig geringerer Übernutzung bereitstellender Ökosystemleistungen (z. B. Bereitstellung von Materialien) beruhen. Sowohl global als auch regional gehen regulierende Ökosystemleistungen (bzw. Beiträge der Natur für Menschen, Nature's Contributions to People) derzeit zunehmend verloren (Brauman et al., 2020).

Die Ausschöpfung von Mehrgewinnen gewinnt immer stärker an Relevanz, denn mehr Klima-, Biodiversitäts- und Gesundheitsschutz sind dringend notwendig. Wasserbezogene Maßnahmen können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Langfristig können wiederum Vorteile für wasserbezogene Ziele entstehen, z. B. wenn die Renaturierung von Ökosystemen Puffer in der Landschaft schafft und dabei auch zur Abschwächung der globalen Erwärmung beiträgt, denn dadurch wird die Nutzbarkeit naturbasierter Maßnahmen in der Fläche erleichtert. Wenn die Anpassung an und die Vermeidung von Umweltveränderungen grundsätzlich integriert gedacht werden, können sich Vorteile für beides ergeben, was die Bedeutung multisektoraler Kooperation unterstreicht (Boyd et al., 2022).

Mehrgewinne hängen auch von einer zielgerichteten Planung und Umsetzung ab. Mögliche positive Auswirkungen von Maßnahmen für Klimaschutz und Biodiversität, menschliche Gesundheit und Wohlbefinden sowie andere Ziele nachhaltiger Entwicklung sollten daher antizipiert und gezielt in der Planung angestrebt, wenn möglich evaluiert und im Auswahlprozess von Maßnahmen berücksichtigt werden. Auch hier müssen verschiedene Zeithorizonte und mögliche Wirkungsverzögerungen beachtet sowie unterschiedliche räumliche Ebenen integriert betrachtet werden.

Auch die Verringerung sozialer und gesundheitlicher Ungleichheiten, die in Zusammenhang mit der ungleichen Verteilung von Umweltbelastungen und -ressourcen stehen und durch den Klimawandel verstärkt werden, kann ein Mehrgewinn sein (Stroud et al., 2022). Hierfür müssen die Bedürfnisse benachteiligter Gruppen beachtet werden, z. B. sollten urbane Grünräume hinreichend erreichbar, zugänglich und geeignet gestaltet sein (Kap. 6.4). Zudem können – insbesondere großskalige – wasserbezogene Maßnahmen Gelegenheitsfenster bieten,

die Rahmenbedingungen für gesunde und nachhaltige Lebensstile zu verbessern und so der Entstehung von Ungleichheiten entgegenzuwirken, etwa in den Lebensbereichen Ernähren, Bewegen und Wohnen (WBGU, 2023).

Ein Beispiel sind mögliche positive Effekte auf das Mobilitätsverhalten von Stadtbewohner:innen. Betreffen etwa großräumige Maßnahmen zur Anpassung von Wasserinfrastruktur auch den Straßenraum, kann darauf geachtet werden, dass hinreichende Flächen für den Fuß- und Radverkehr zur Verfügung stehen. So kann aktive Mobilität gefördert werden, mit zahlreichen ökologischen und gesundheitlichen Mehrgewinnen (WBGU, 2023).

6.1.2.4

Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen

Neben negativen Effekten im Sinne einer Fehlanpassung (Abb. 6.1-1) können sich auch weitere nicht intendierte (unbeabsichtigte) Konsequenzen ergeben. Viele Maßnahmen besitzen mehrfache wasserbezogene Auswirkungen, zum Teil mit deutlichen und grenzüberschreitenden Verschiebungen in der Wasserverteilung. Daraus können sich Ziel- und Interessenkonflikte ergeben, die benannt und überwunden werden müssen. Beispielsweise kann der Neubau einer Talsperre kurzfristig die Resilienz der regionalen Trinkwasserversorgung erhöhen und die Nutzung von Wasserkraft ermöglichen, dabei jedoch langfristig das Abflussregime des Fließgewässers im Unterstrom maßgeblich verändern, zu erhöhten Verdunstungsverlusten führen und in Folge von Algenblüten die Wasserqualität beeinträchtigen. Weitere Beispiele sind Fernwasserleitungen mit Auswirkungen auf das Dargebot im Gewinnungsgebiet oder Geoengineering zur Erzeugung künstlicher Niederschläge mit Veränderungen natürlicher Niederschläge über Landesgrenzen hinweg.

Maßnahmen können auch nicht intendierte ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Konsequenzen haben. Beispiele sind der Verlust lokaler Biodiversität in Folge der Anlage großer Stauseen oder durch die Einleitung von Konzentraten aus der Meerwasserentsalzung ins Meer (Kap. 6.2), die mögliche Begünstigung von Infektionskrankheiten durch den Ausbau von Agroforstwirtschaft (Rosenstock et al., 2019; Kap. 6.3) oder die Verdrängung benachteiligter Bevölkerungsgruppen durch ökonomische Aufwertung von Stadtteilen und Formalisierung informeller Räume in Folge des Ausbaus von blau-grüner Infrastruktur in Städten (Kap. 6.4).

Dass verschiedene beabsichtigte und nicht beabsichtigte Konsequenzen sich gegenseitig beeinflussen, wird anhand des Diama-Staudamms in Senegal deutlich. Seine Fertigstellung 1986 ermöglichte eine verbesserte Wasserversorgung für die regionale Landwirtschaft und die Erzeugung von Wasserkraft. Sie ging jedoch mit einer Verhinderung der Wanderung von Flussgarnelen zwischen verschiedenen Flussabschnitten einher – mit der Folge

einer deutlichen Zunahme der Inzidenz der parasitären Infektionskrankheit Schistosomiasis (Bilharziose), weil die Flussgarnelen an manchen Orten als Fressfeinde der als Zwischenwirte fungierenden Wasserschnecken wegfielen (Sokolow et al., 2015). Zudem können sich aus nicht intendierten Konsequenzen negative Rückwirkungen auf wasserbezogene Ziele ergeben, z. B. durch Treibhausgasemissionen aus einem Stausee in tropischen Regionen, die über ihren Beitrag zum Klimawandel zu den Verschärfungen im Wassersektor beitragen (Kumar et al., 2023a).

Nicht intendierte Konsequenzen können entlang der Kriterien Absehbarkeit und Vermeidbarkeit kategorisiert werden (Abb. 6.1-2; Suckling et al., 2021), was ein wesentlicher Ansatzpunkt für ihre Vermeidung ist. Konsequenzen, die vorab absehbar und vermeidbar sind, können durch zielgerichtete Planung verhindert werden, wofür jedoch ein systemischer Ansatz und entsprechender politischer Wille Voraussetzungen sind. Konsequenzen, die zwar absehbar sind, jedoch aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen nicht vermieden werden können, können durch flankierende Maßnahmen abgemildert werden. Konsequenzen, die prinzipiell vermeidbar sind, jedoch aufgrund mangelnder Daten nicht vorhersehbar, können teilweise vermieden werden, wenn vorausschauend unter Berücksichtigung von Unsicherheiten agiert wird. Eine kontinuierliche Evaluation, die konsequente Einbeziehung sozialer Folgen von Maßnahmen in Modellierung und Entscheidungsfindung im Sinne eines sozial-hydrologischen Ansatzes sowie eine fehlertolerante, flexible und adaptive Planung mit dezentralen und modularen Maßnahmen sind hierfür ausschlaggebend (Walker et al., 2015).

Besteht die Möglichkeit, nicht intendierte Konsequenzen in den Bereich „absehbar und vermeidbar“ zu verschieben, wird ihre Vermeidung leichter (Sowby und Hotchkiss, 2022). Eine weiterentwickelte kombinierte Umwelt- und Gesundheitsfolgenabschätzung, etwa in Form einer harmonisierten Folgenabschätzung von Maßnahmen, wäre hierfür von Vorteil (Osofsky und Pongsiri, 2018; SRU, 2023). Es sollten zudem offene Diskussionen mit interdisziplinären Teams über mögliche Projektauswirkungen stattfinden, die sich an einschlägigen Katalogen möglicher Folgewirkungen orientieren (Sowby und Hotchkiss, 2022). Eine partizipative Planung im Sinne eines transdisziplinären Ansatzes kann helfen, unterschiedliche Perspektiven, Bedürfnisse, Betroffenheiten und Teilhabe verschiedener Akteur:innen einzubeziehen (Walker et al., 2015). Hierbei muss darauf geachtet werden, den Dialog hinreichend offen zu gestalten, etwa indem technische Planungskriterien nicht von vornherein fest veranschlagt werden (Farmer et al., 2015). Zudem ist entscheidend, marginalisierten Akteur:innen die Partizipation nicht nur formal anzubieten, sondern auch

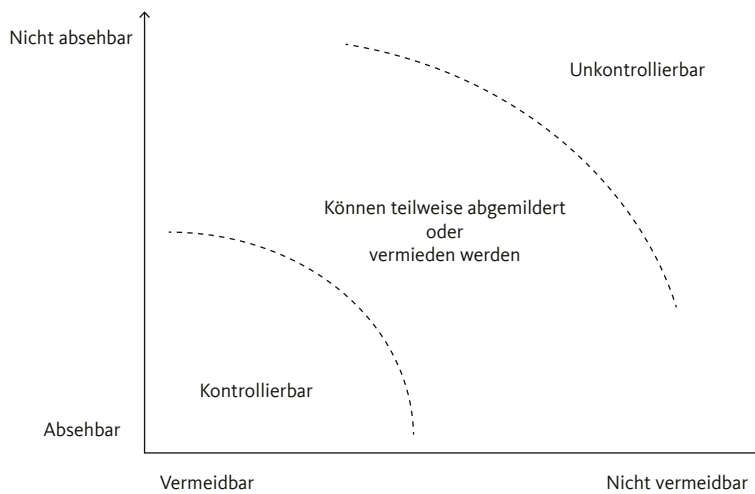


Abbildung 6.1-2

Mögliche Kategorisierung nicht intendierter Konsequenzen nach Absehbarkeit und Vermeidbarkeit. Konsequenzen, die absehbar und vermeidbar sind, können durch zielgerichtete Planung verhindert werden. Konsequenzen, die zwar absehbar sind, jedoch nicht vermieden werden können, können durch flankierende Maßnahmen abgemildert werden. Konsequenzen, die prinzipiell vermeidbar sind, jedoch nicht vorhersehbar, können teilweise verhindert werden, wenn vorausschauend unter Berücksichtigung von Unsicherheiten agiert wird. Nicht intendierte Konsequenzen in den Bereich „absehbar und vermeidbar“ zu verschieben, erleichtert ihre Vermeidung.

Quelle: Suckling et al., 2021

zu ermöglichen. Dies kann geschehen, indem Zugangsbarrieren verringert werden, etwa durch zugeschnittene Informationsangebote, finanzielle Kompensation, räumliche Erreichbarkeit, organisatorische Unterstützung und Bereitstellung diskriminierungsfreier Räume.

6.1.3 Instrumente zur Abwägung unter Unsicherheit

Für Akteur:innen des Wassermanagements muss es möglich sein, zu beurteilen, ob die Umsetzung einer Maßnahme einen gesellschaftlichen Mehrwert bringt, und verschiedene Maßnahmen zu vergleichen. Die im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Anforderungen müssen hierzu in eine Bewertungsmethodik überführt werden. Eine besondere Herausforderung besteht dabei in der zunehmenden Unsicherheit, die eine Bewertung basierend auf historischen Erwartungswerten wenig zielführend macht.

Projektionen für Klimaänderungen, ihre Auswirkungen und sozioökonomische Entwicklungen resultieren in einer Vielfalt möglicher Szenarien, die „top-down“ auf die lokale Ebene heruntergebrochen werden können. Allerdings besteht hierbei die Gefahr, dass angesichts der Vielfalt unsicherer Faktoren Maßnahmen priorisiert werden, die zwar allen Dimensionen von Unsicherheit Rechnung tragen, aber insgesamt nicht zielführend oder überdimensioniert sind. Daher kann es hilfreich sein, das Problem „bottom-up“ und schrittweise anzugehen. Unter Berücksichtigung lokaler Vulnerabilitäten und als nicht akzeptabel eingestufte Risiken können die vier erläuterten Anforderungen an Maßnahmen zunächst im spezifischen Kontext konkretisiert und anschließend mit den Ergebnissen von Klimamodellen verbunden werden,

um Risikoanalysen und Entscheidungen zu informieren. Methoden, die eine solche Vorgehensweise mit konsistenten und replizierbaren Ergebnissen ermöglichen, existieren bereits (Beek et al., 2022), z. B. „Decision Scaling“ (Kasten 6.1-2; Brown, 2011; Brown et al., 2011; Brown et al., 2012; Hallegatte et al., 2012). Beispiele für Ansätze, die diese Methode nutzen, sind das Decision Tree Framework der Weltbank (Ray und Brown, 2015) und die Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA; Mendoza et al., 2018; Kasten 6.1-2).

Im Zuge des Bottom-up-Prozesses braucht es eine Identifikation und Zurechnung von relevanten Aspekten und eine Abgrenzung des Betrachtungszeitraums. Werden wichtige Effekte vernachlässigt oder wird der Zeitraum zu kurz gewählt, kann es zu Fehleinschätzungen hinsichtlich akzeptabler Risiken kommen, etwa wenn Wertschöpfungsverluste oder Effekte für Gesundheit und Biodiversität nicht angemessen einbezogen werden. Allerdings erhöht das Einbeziehen jedes weiteren Effektes und die Betrachtung längerer Zeiträume die Komplexität der Analyse – auch, weil die Unsicherheit zunimmt.

Hinsichtlich der Bewertung von Maßnahmen stellt sich zudem die Herausforderung, wie Wirkungen, Mehrgewinne und Nebeneffekte gemessen und vergleichbar gemacht werden können. Dies gilt insbesondere für Effekte, für welche eine monetäre Quantifizierung, beispielsweise über Marktpreise oder hypothetische Zahlungsbereitschaften, schwierig oder unmöglich ist. Hinzu kommt die Frage, wie mit Zielkonflikten und Nutzungskonkurrenzen umgegangen werden kann. Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Effekte und betroffenen Stakeholder sind Zielkonflikte in verschiedenen Dimensionen zu erwarten, z. B. zwischen gewünschten oder zu vermeidenden Effekten, zwischen Stadtteilen oder Regionen und auf unterschiedlichen zeitlichen

Kasten 6.1-2**Decision Scaling**

Die Methode des „Decision Scaling“ wurde für den Umgang mit Unsicherheiten infolge des Klimawandels in Planungs- und Designprozessen entwickelt. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt Decision Scaling einen Prozess, in welchem zunächst analysiert wird, welche Art von Klimaveränderungen Probleme verursachen würde, und dann Klimamodelle verwendet werden, um einzuschätzen, ob diese Art von Veränderungen wahrscheinlich ist (Brown, 2011).

Der Vorteil von Decision Scaling gegenüber Ansätzen, welche von einer Top-down-Szenarienanalyse ausgehen, ist, dass es zunächst bei bekannten Größen ansetzt: dem bestehenden System und seiner Performance unter verschiedenen Szenarien und Designs. Erst in den weiteren Schritten wird Unsicherheit zunehmend berücksichtigt und die Komplexität erhöht (Mendoza et al., 2018). Decision Scaling ist als interaktiver Prozess unter Einbeziehung relevanter Stakeholder aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft ausgelegt.

Brown (2011) beschreibt die Vorgehensweise des Decision Scaling wie folgt:

In einem ersten Schritt legen relevante Stakeholder-Gruppen gemeinsam Ziele einer Entscheidung und Performance-Indikatoren zur Bewertung unterschiedlicher Alternativen fest. In einer Risikoanalyse wird untersucht, welche Klimawandel-

auswirkungen von Bedeutung sind, und es werden Schwellenwerte bestimmt, deren Überschreiten inakzeptabel wäre und präventive Vermeidungsmaßnahmen erfordern würde.

Anschließend wird das Verhalten des Systems unter Veränderungen der klimatischen Bedingungen modelliert. Dafür können je nach Kontext komplexe oder auch sehr einfache Modelle gewählt werden. Betrachtet werden sollte eine möglichst weite Spannbreite verschiedener Bedingungen, um Rückschlüsse auf die Vulnerabilität oder Resilienz eines Systems bei verschiedenen Entscheidungsalternativen ziehen zu können. Die Analyse kann zeigen, dass ein System kaum auf Klimaveränderungen reagiert, oder auch, dass eine Maßnahme einer anderen unter allen betrachteten Veränderungen überlegen ist. In diesem Fall kann es unnötig sein, zu untersuchen, welche zukünftigen Klimaveränderungen mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten werden. Zu erwarten ist jedoch in der Regel, dass diese Analyse Klimarisiken für das System sowie dessen Schwachstellen aufzeigt.

Im letzten Schritt wird bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die zuvor als relevant für das System identifizierten Klimaveränderungen eintreten. Erst an dieser Stelle des Prozesses werden Klimamodelle benötigt. Als Ergebnis liefert die Decision-Scaling-Methode eine Liste der zu bevorzugenden Entscheidungen für verschiedene klimatische Bedingungen und eine erste Abschätzung, mit welchen Wahrscheinlichkeiten diese Bedingungen eintreten werden.

Skalen, z. B. zwischen verschiedenen Generationen. Eine Lösung von Zielkonflikten und Priorisierung zwischen verschiedenen Zielen kann dabei immer nur lokal und kontextspezifisch geschehen. Hierfür ist der Aufbau von Kapazitäten und Expertise, die lokale Entscheider:innen unterstützen, notwendig.

Ein weit verbreiteter Ansatz zur Bewertung von Maßnahmen ist die Kosten-Nutzen-Analyse. Diese versucht alle im Zusammenhang mit einer Maßnahme stehenden Kosten und Nutzen über monetäre Werte zu erfassen und damit eine Entscheidung zwischen verschiedenen Maßnahmen zu ermöglichen. Die Kosten-Nutzen-Analyse kommt an ihre Grenzen, wenn monetäre Werte von Wirkungen, Mehrgewinnen und Nebeneffekten nicht oder nicht adäquat bemessen werden können. In diesem Fall ist es zielführend, Bewertungsmethoden heranzuziehen, welche zum einen monetäre und zum anderen nicht monetäre Effekte einbeziehen. Ein Beispiel ist die bei Planungsprozessen im Wassersektor bereits oft eingesetzte Multikriterien-Analyse. Diese erfasst die Wirkungen, Mehrgewinne und unerwünschten Nebeneffekte einer Maßnahme und bewertet sie relativ. Die Gesamtbewertung einer Maßnahme hängt dabei entscheidend von der Gewichtung der verschiedenen Effekte ab, so dass über die Gewichtung eine Priorisierung erfolgen kann. Sie sollte über einen gesellschaftlichen Aushandlungsprozess vollzogen werden, der möglichst

alle betroffenen Stakeholder integriert (siehe z. B. Alves et al., 2018b für Flutrisiken).

Bei der Auswahl einer Maßnahme oder Maßnahmenkombination und in der weiteren Planung sollte auch bedacht werden, wie Verteilungsprobleme adressiert und Verlierer:innen der Maßnahme (z. B. Landwirt:innen, deren Flächen aus der landwirtschaftlichen Nutzung genommen werden) adäquat entschädigt werden können. Auch sollte eruiert werden, ob nicht intendierte Konsequenzen durch eine angepasste Ausgestaltung der Maßnahme oder durch flankierende Maßnahmen vermieden oder minimiert werden können. Schließlich ist die Finanzierung der Maßnahmen zu ermöglichen, was unter zunehmender Unsicherheit ebenfalls eine Herausforderung sein kann (Kap. 6.1.1, 8.3).

6.1.4**Steuerung durch Planung und Zulassung**

Ein klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement kann nur realisiert werden, wenn eine Aufgabenzuweisung an die im jeweiligen nationalen Kontext richtigen Akteure erfolgt. Diesbezüglich bestehen bei der Steuerung durch Planung eine Reihe von Herausforderungen, die zu bewältigen sind (Kasten 6.1-3).

Diese Herausforderungen treten insbesondere bei

Kasten 6.1-3**Steuerung durch Planung**

Planung als vom Einzelfall unabhängige, zukunftsgerichtet gestaltende Steuerung ist Ausdruck des Vorsorgeprinzips. Ausgehend vom Ist-Zustand wird unter Einbeziehung verschiedener Szenarien die zukünftige Entwicklung prognostiziert. Daraufhin wird ein normatives Ziel formuliert, das mittels eines Plans möglichst effektiv erreicht werden soll. Planung zielt auf den Ausgleich konfligierender Interessen, soll Maßnahmen und Ansprüche koordinieren und ein auf Konnexität gerichtetes gestalterisches Konzept entwickeln. Pläne steuern innerhalb der Gestaltungsfreiheit des Planungsträgers in abstrakt-genereller Form die Zielerreichung, weshalb Pläne auf eine nachgeordnete Umsetzung angewiesen sind (Schlacke, 2021). Zudem erleichtert Planung die Gesetzgebung, die sich auf die Festlegung von Zielen und Verfahren beschränken kann, und die konkreten Maßnahmen dem Planungsträger – in der Regel der Verwaltung – überlässt.

Hierin liegt jedoch auch eine Schwäche von Planung, insbesondere in der Wassergovernance der EU. Darin werden seitens des EU-Gesetzgebers hoch ambitionierte Ziele festgelegt, wie etwa einen guten chemischen, ökologischen und mengenmäßigen Gewässerzustand zu bewahren oder herzustellen. Die Mitgliedstaaten bzw. deren Verwaltungen haben die Pflicht, ihren Gewässerzustand zu analysieren, Maßnahmen zur Erreichung des guten Gewässerzustands aufzuzeigen und in einen rechtsverbindlichen Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplan zu transferieren.

Die EU verpflichtet die Mitgliedstaaten in vielen Umweltbereichen, wie etwa dem Klimaschutz, der Luftreinhaltung oder der Landnutzung (Nitrateinträge), zum Erlass von Maßnahmenplänen. Oftmals fehlt es an der Umsetzung: Pläne werden nicht aufgestellt oder fortgeschrieben oder es werden nicht die in ihnen festgelegten Maßnahmen ergriffen. Hinzu kommt, dass es in einem Bundesstaat wie Deutschland beispielsweise 16 Bundesländern obliegt, Pläne aufzustellen und umzusetzen. Mitunter wird diese Umsetzung weiter delegiert auf die kleinsten Einheiten im Staat, die lokalen Gemeinden, die damit nicht selten überfordert sind. Entmaterialisierte Planungen und Delegation von Umsetzung auf kleinste, häufig weder personell noch finanziell ausreichend ausgestattete Verwaltungseinheiten bergen eine hohe Gefahr von Umsetzungs- und Vollzugsdefiziten. Dieses Problem ist umso größer, je größer der Entscheidungsspielraum der Akteure ist, die die gestaltungsoffenen Pläne durch Einzelmaßnahmen umsetzen müssen (Durner und Ludwig, 2008). Wenn Politik und Gesetzgeber nur unzureichend steuern, indem sie ihre Steuerungsmacht durch Planungsverpflichtungen auf nachgelagerte Politikebenen verlagern, die diese dann zwar befolgen, allerdings nicht ausreichend umsetzen können, dann wird der vorsorgende Auftrag der Planung konterkariert. Zudem sind Planungsprozesse mitunter schwerfällig, da sie die Verfügbarkeit ausreichender (Umwelt-)Daten für die erforderliche Prognose über die zukünftige Entwicklung voraussetzen, was eine schnelle Reaktion auf neu einsetzende Entwicklungen erschwert (Schlacke, 2023).

der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu Tage: Hier wird mit dem Gebot, einen guten ökologischen Gewässerzustand herzustellen, und mit dem kehrseitigen Verschlechterungsverbot (Kap. 2) ein ambitioniertes und mittlerweile auch definiertes Ziel für ein klimaresilientes Wassermanagement angestrebt. Ein guter ökologischer Gewässerzustand soll durch eine Maßnahmen- und eine Bewirtschaftungsplanung der Gewässer erreicht werden. Diese werden u. a. durch Einzelfallentscheidungen, wie etwa Einleitungsgenehmigungen bzw. -versagungen, lokal umgesetzt.

Trotz weitreichender, seit mehr als zwei Jahrzehnten erfolgender Planungen, hat sich der EU-weite Gewässerzustand nicht maßgeblich verbessert. Es mangelt an einer effektiven Umsetzung dieser Ziele durch Pläne und konkrete behördliche Einzelfallentscheidungen. Diesem Defizit wirkt die jüngste Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) entgegen. Der Gerichtshof hat die Wasserrahmenrichtlinie so ausgelegt, dass die Genehmigung für ein konkretes Vorhaben – hier: Vertiefung der Weser zwecks Verbesserung der Schiffbarkeit – bereits dann zu versagen ist, wenn dadurch die Erreichung des im Bewirtschaftungsplan festgelegten guten Zustands eines Oberflächengewässers gefährdet wird (EuGH, 2015).

Im Gefolge dessen besteht auch eine entsprechende

Vorabprüfungspflicht der Auswirkungen eines Vorhabens auf die Gewässer (EuGH, 2020). Nur wenn die wasserwirtschaftlichen Planungen das nachgelagerte Einzelfallermessen vorstrukturieren (Kloepfer und Durner, 2020), entfalten sie in der Praxis Wirkung. Die internen Verpflichtungen müssen auch gegenüber Einleitern und Nutzern zum Tragen kommen. Damit ist der EuGH der Akteur, der die wasserrechtlichen Pflichten der Mitgliedstaaten effektuiert hat. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht ausreichend: Ein Gericht kann eine Rechtsnorm nur dann auslegen, wenn es zuständig ist und angerufen wird. Es klärt Einzelfragen, die im jeweiligen Verfahren relevant sind, und wird nicht quasi-gesetzgeberisch tätig. Auch insofern ist der Gewaltenteilungsgrundsatz berührt. Die Verwerfungskompetenz von Normen haben grundsätzlich nur Verfassungsgerichte, wenngleich EuGH-Entscheidungen im Rahmen von Vorlageverfahren zur Auslegung des EU-Rechts eine größere Reichweite zukommt als Einzelfallentscheidungen, die nur die jeweiligen Parteien binden. Wenngleich die Konkretisierungsleistungen des EuGH zu einer besseren Durchsetzung des EU-weiten Gewässerschutzrechts führen, bleiben sie letztlich punktueller und nicht systemischer Natur. Zudem ist das EU-Recht als supranationale Rechtsordnung, die gegenüber den Mitgliedstaaten auch gerichtlich durchgesetzt werden kann,

ein nicht auf andere Regionen übertragbarer Sonderfall.

Anhand dieses Beispiels wird dennoch deutlich, dass ein klimaresilientes Wassermanagement die Zuweisung von Aufgaben an die jeweils richtigen Akteure sicherstellen muss. Zu einem gewissen Grad können Versäumnisse durch andere Akteure kompensiert werden. Die Konflikte zwischen widerstreitenden Belangen müssen bereits durch klare Vorgaben in den Gesetzen – wie etwa Bauverbote in Überschwemmungsgebieten – geklärt werden und nicht lediglich auf Planungen delegiert werden. Planungen dürfen nicht verwaltungsbehördliche Pflichtübungen sein, sondern sollten vorsorgend Konflikte koordinieren und lösen. So entfalten sie eine Steuerungswirkung für Einzelfallentscheidungen. Ansonsten entstehen strukturelle Regelungs- und Vollzugsdefizite.

Umgekehrtes gilt für die Infrastrukturplanung. Statt Delegation auf die fachlich versierten Behörden, die diese Einzelfallentscheidung für ein Vorhaben treffen können, zieht der Gesetzgeber jüngst diese Aufgaben an sich und erledigt sie mittels gesetzlicher Zulassung von Anlagen wie den Ausbau von Gewässern (Legalplanung). Dies mag auf den ersten Blick zwar eine Steigerung der demokratischen Legitimation von Planungsentscheidungen und eine Beschleunigung bewirken. Jedoch werden dabei die Funktionsgrenzen parlamentarischer Entscheidungen erreicht: Aufgrund des begrenzten Wissens zu technisch komplexen Themen aufseiten des Gesetzgebers sind dessen Planungsentscheidungen in der Praxis durch notwendig hinzugezogenes Expert:innenwissen bereits so weit vorgeprägt, dass die parlamentarische Entscheidung wie eine Formalie wirkt (Durner, 2021).

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Verschärfungen im Wassersektor und zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts ist nach Ansicht des WBGU neben der richtigen Akteurswahl zudem erforderlich, dass zuständige staatliche Stellen bei Planungs- und Zulassungsentscheidungen künftig die vier in Kap. 6.1.2 dargestellten Anforderungen berücksichtigen (Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen, Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext, stärkere Berücksichtigung möglicher Mehrgewinne, Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen). Im deutschen Wasserhaushalts-, Umwelt- und Planungsrecht sollte dies innerhalb von behördlichen Abwägungs- und Ermessensentscheidungen erfolgen. Praktisch könnte dies etwa bedeuten, dass nach Hochwasserereignissen in potenziell auch zukünftigen Überschwemmungsgebieten Bauverbote erteilt werden. Die konsequente Berücksichtigung der vier Anforderungen stellt Behörden, die Planungs- und Zulassungsentscheidungen im Gewässerschutzrecht zu treffen haben, insgesamt vor große Herausforderungen, die durch künftig zunehmend erforderliches Handeln und Entscheiden unter Unsicherheit noch vergrößert werden.

Es gibt bisher kaum systematische Überlegungen dazu, wie bestehende Planungs- und Entscheidungsprozesse verändert werden müssen, um Maßnahmen zu implementieren, die den Verschärfungen im Wassersektor gerecht werden. Hier besteht entsprechend dringender Forschungsbedarf (Kap. 6.6.1).

6.2 Lösungsraum Ökosysteme

Ökosysteme erbringen eine Vielzahl an Leistungen, die dem Menschen und der Natur als Lebensgrundlagen dienen. Ökosystemleistungen, die direkten Bezug zu Wasser und damit eine Wirkung auf und Bedeutung für Wassermanagement haben, sind die Gesunderhaltung von Lebensräumen, die Regulierung des Klimas, der Süßwassermenge und der Qualität von Süßwasservorkommen und Küstengewässern, der Aufbau, der Schutz und die Dekontamination von Böden, die Regulierung von Gefahren und Extremereignissen sowie die Regulierung von Schädlingen und Krankheiten (IPBES, 2019b). In welchem Umfang wasserbezogene Ökosystemleistungen zur Verfügung gestellt werden können, hängt von der Intaktheit, Funktionalität und Größe der betreffenden Lebensräume ab und damit im Anthropozän auch von der Raumplanung durch den Menschen. Landschaft, Böden und deren Ökosysteme können ihre Funktionen als Puffer und Speicher von Wasser nur dann ausreichend erfüllen, wenn sie stärker als bisher naturorientiert gestaltet, d. h. renaturiert, werden. Dies bedeutet u. a. weniger Versiegelung, weniger industrielle Landwirtschaft, mehr Wiedervernässung, mehr Wiederaufforstung und mehr städtische Retentions- und Versickerungsflächen.

6.2.1 Renaturierung für klimaresilientes Wassermanagement

Renaturierung bezeichnet die Wiederherstellung eines in sich funktionierenden Ökosystems, das nach seiner Renaturierung ausreichend resilient ist, um Störungen – etwa durch Wetterextreme wie plötzliche Überschwemmungen oder langanhaltende Trockenphasen – so verarbeiten zu können, dass keine bleibenden Schäden am Ökosystem und seiner Biodiversität auftreten. In resilienten Ökosystemen bleibt nach einer Störung oder einer Verschärfung der Umweltbedingungen ein „Zurückschwingen“ in die Nähe des Ausgangszustands möglich. Dabei wird die Schwelle nicht überschritten, die eine fundamentale strukturelle Umorganisation des Ökosystems mit möglicherweise weitreichenden Auswirkungen auf erbrachte Ökosystemleistungen und

Biodiversität auslösen würde. Insofern sollte es auch Ziel klimaresilienten Wassermanagements sein, die Resilienz von Ökosystemen zu steigern.

Da jedoch nach einer Störung der Ausgangszustand eines Ökosystems meist nicht exakt wiederhergestellt, sondern nur ein neuer naturnaher Zustand erreicht wird, kann bei der Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen auch von einer „Naturierung“ hin zu einem neuen Ökosystemzustand gesprochen werden. Der WBGU verwendet im Folgenden die Begriffe Renaturierung bzw. renaturieren.

Über verschiedene Ökosystemtypen hinweg gibt es zahlreiche Maßnahmen zu ihrer wasserbezogenen Renaturierung (Tab. 6.2-1). Neben technischen Maßnahmen können auch verschiedene Arten als „Ökosystemingenieure“ Einfluss auf die Wassermenge und die Verfügbarkeit von Nährstoffen in aquatischen Lebensräumen haben. Beispiele sind der Biber, dessen Ansiedlung zu einer erhöhten Wasserspeicherung führt, oder die Schermaus, die eine Entwässerung von (zu) nassen Böden bewirken kann. So können Revegetation, Rewilding und die gezielte Ansiedlung von Ökosystemingenieuren Maßnahmen sein, bestimmte Ökosystemtypen zu renaturieren und zu einem klimaresilienten Wassermanagement beizutragen

(Harvey und Henshaw, 2023; Polvi und Sarneel, 2017).

Neben der Festlegung eines Zielzustands für das Ökosystem sollte bei der Auswahl von Renaturierungsmaßnahmen auch bedacht werden, dass infolge biotischer (z. B. invasive Arten) und abiotischer (z. B. Klimawandel) Veränderungen neue Ökosystemtypen entstehen können (novel or emerging ecosystems; Hobbs et al., 2009). Neu entstehende Ökosysteme können, im Vergleich zu den zuvor lokal vorherrschenden Ökosystemtypen, beispielsweise veränderte Artenzusammensetzungen oder Funktionen aufweisen (Hobbs et al., 2009). Dann ist es möglich, dass die gewählten Renaturierungsmaßnahmen in den neu entstehenden Ökosystemen nicht greifen. Außerdem können die neu entstehenden Ökosysteme z. B. Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben, die noch nicht absehbar sind und mittel- bis langfristig zusätzliche Renaturierungsmaßnahmen nötig machen. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf. Ein Beispiel für neu entstehende Ökosysteme sind postglaziale Ökosysteme (Bosson et al., 2023).

Bei der Auswahl und Planung von Renaturierungsmaßnahmen sollten unbedingt alle relevanten Akteure in die Flächenplanung einbezogen werden. Angesichts der limitierten Verfügbarkeit von Fläche ist Renaturierung

Tabelle 6.2-1

Ausgewählte Ökosystemtypen mit Beispielen für Renaturierungsmaßnahmen. Unterschiedliche Intensitäten menschlicher Nutzung und die jeweiligen Renaturierungsmaßnahmen können durch die Umsetzung bzw. Anwendung des multifunktionalen Mosaikansatzes aufeinander abgestimmt werden und so dazu beitragen, Zielkonflikte zu verringern und Mehrgewinne für Biodiversität und Mensch zu generieren.

Quelle: WBGU

Renaturierungsmaßnahmen	Ökosystemtypen	Seen und Uferzonen	Moore	Sumpfbiete	Flüsse und Auen	Wälder	Graslandschaften	Gebirgslandschaften	Urbane Ökosysteme	Küstenökosysteme	Kultur- und Agrarlandschaften
Ansiedlung von Ökosystemingenieuren	•	•	•	•	•	•	•		•		
Wiedervernässung	•	•	•	•							
Wiederherstellung natürlicher Wasserläufe	•	•	•	•			•	•		•	
Wiederaufforstung, Agroforstwirtschaft	•		•	•	•		•				•
Sedimentmanagement	•	•	•	•					•		
Strukturierung von Uferböschungen	•			•				•	•	•	
Anlage von Gewässerrandstreifen	•			•				•			
Bau technischer Fischwanderhilfen				•				•			
Infrastrukturrückbau und -umbau	•	•	•	•			•	•	•		
Einbau naturnaher Strukturelemente	•	•	•	•				•	•	•	

meist mit Zielkonflikten in der Landnutzung verbunden. Diese gilt es mit dem Ziel von Mehrgewinnen auszubalancieren (WBGU, 2020). Durch Planung nach dem Leitbild eines multifunktionalen Landschaftsmosaiks können Nutzung und Schutz von Fläche langfristig erfolgreich miteinander vereint werden (WBGU, 2024). Dafür spielt die Renaturierung von Ökosystemen als Teil eines klimaresilienten Wassermanagements eine wichtige Rolle.

6.2.2

Renaturierung von Feuchtgebieten

Alle Ökosysteme sind für ein klimaresilientes Wassermanagement von Bedeutung. Beispielsweise sind Berge die „Wassertürme“ der Erde (Viviroli et al., 2007; Kap. 4.4), Graslandschaften und Wälder sind essenziell für die Versickerung, Speicherung und Filterung von Wasser. Feuchtgebiete sind als Ökosysteme selbst und als Bindeglied zwischen verschiedenen Ökosystemtypen bedeutsam. Feuchtgebiete sind, laut Definition der Ramsar Konvention, „Feuchtwiesen, Moor- und Sumpfgebiete oder Gewässer, die natürlich oder künstlich, dauernd oder zeitweilig, stehend oder fließend, Süß-, Brack- oder Salzwasser sind, einschliesslich solcher Meeresgebiete, die eine Tiefe von sechs Metern bei Niedrigwasser nicht übersteigen“ (UNESCO, 1971: Art. 1).

Nach aktuellem Forschungsstand bedecken Feuchtgebiete knapp 9 % der Landoberfläche weltweit (Meli et al., 2014) und speichern einen großen Teil des globalen terrestrischen Kohlenstoffs. Allein Moore speichern weltweit mehr als 600 Mrd. t Kohlenstoff, was etwa 44 % des gesamten im Boden gespeicherten Kohlenstoffs entspricht und damit den in sonstiger Vegetation, einschließlich Wäldern gespeicherten Kohlenstoff übertrifft (IUCN, 2021). Damit tragen Feuchtgebiete maßgeblich zur Klimaregulation bei.

Neben ihrer Bedeutung für den Klimawandel erbringen Feuchtgebiete eine Reihe an Ökosystemleistungen: Sie speichern Wasser, halten den Grundwasserspiegel aufrecht, bieten Lebensraum für spezialisierte Tiere und Pflanzen und tragen zum Erhalt der Biodiversität bei. Sie leisten einen Beitrag zu einer stabilen Trinkwasserversorgung und stellen Rohstoffe und Nahrung bereit, z. B. Torf und Fisch. Sie schützen Flussufer und Küstenlinien vor Überschwemmungen und Erosion, dienen als Transportwege und ermöglichen Erholung und Tourismus. Nicht zuletzt sind sie ein wichtiges Element vieler lokaler Religionen und Traditionen (Wang und Ma, 2016; Deng et al., 2022; Davidson et al., 2019; UNEP, 2021b). Feuchtgebiete sind für die Erhaltung der Lebensgrundlagen von zentraler Bedeutung. Sie bieten außerdem enormen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Nutzen, die Bereitstellung von Ökosystemleistungen durch

Feuchtgebiete macht knapp 40–45 % des monetären Wertes der Ökosystemleistungen aller Ökosysteme weltweit aus (Davidson et al., 2019; UNEP, 2021b).

Seit der vorindustriellen Ära sind schätzungsweise mehr als 80 % der weltweiten Feuchtgebiete durch Landnutzungsänderungen und Entwässerung verloren gegangen, die verbleibenden Feuchtgebiete sind größtenteils degradiert (UNEP, 2021b). Feuchtgebiete gehen weiterhin verloren, und in trockenen Regionen ist die Verlustrate sogar knapp 10 % höher als der globale Durchschnitt (Wang et al., 2023). Dürren und Dürreperioden haben verringerte Wassermengen zur Folge, die durch die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels sowie die steigende globale Wassernachfrage noch weiter abnehmen werden (Wang und Ma, 2016; UNEP, 2021b). Der Bau von Staudämmen, unkontrollierte Brände, Verschmutzung und Abholzung verändern Feuchtgebiete, führen zu Artenverlusten und beeinträchtigen ihre Fähigkeit, Wasser, Rohstoffe und Nahrung zu liefern (UNEP, 2021b).

Nur wenn die vielfältigen wasserbezogenen Ökosystemleistungen von Feuchtgebieten – aber auch aller anderen Ökosystemtypen – erhalten und geschützt werden, kann die Resilienz von Ökosystemen gesteigert werden. Im Folgenden wird am Beispiel von Sümpfen, Mooren und Flusslandschaften exemplarisch dargestellt, wie die in Kapitel 6.1 formulierten Anforderungen an klimaresilientes Wassermanagement (wasserbezogene Wirksamkeit, Machbarkeit, Mehrgewinne und unbeabsichtigte Konsequenzen) bei der Auswahl von Renaturierungsmaßnahmen für ein klimaresilientes Wassermanagement angewandt werden können. Ein Beispiel für ein renaturiertes Feuchtgebiet ist in Abb. 6.2-1 dargestellt.

6.2.2.1

Beispiel Sümpfe und Marschen

Bewaldete Süßwassersumpfgebiete und nicht bewaldete Süßwassermarschen existieren weltweit in tropischen und temperaten Regionen (Keith et al., 2022). Sie sind häufig oder kontinuierlich überflutet, akkumulieren keine großen Mengen Torf und liegen oft inmitten landwirtschaftlich genutzter Flächen oder urbaner Landschaften (Finlayson, 2016). Sie werden von Oberflächenwasser oder Grundwasser gespeist, sind reich an Nährstoffen und stellen Nahrung sowie Habitate für eine große Vielfalt an Wasservögeln, Reptilien, Wirbellose und Säugetieren bereit. Auch in ariden und semiariden Regionen sind Marschen und Sümpfe zu finden, z. B. die Mesopotamischen Sumpfgebiete an den Mündungen von Tigris und Euphrat oder die Macquarie Marshes in Australien. Durch die klimatischen Bedingungen stehen Feuchtgebiete insbesondere in diesen Regionen in direkter Konkurrenz zu anderen Wassernutzungen wie Landwirtschaft, Viehzucht oder Industrie (Minckley et al., 2013; Martínez Santos et



Abbildung 6.2-1

Beispiel für ein renaturiertes Feuchtgebiet in Texas (USA). Im Rahmen des „Wetland Reserve Program“ (bzw. des Nachfolgeprogramms „Agricultural Conservation Easement Program“) können Landbesitzer:innen finanzielle und technische Unterstützung für Renaturierungsmaßnahmen erhalten.

Quelle: United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service Texas, CC BY 2.0

al., 2008; Castaño et al., 2018; Quijano-Baron et al., 2022).

Sümpfe und Marschen haben einen signifikanten Einfluss auf den Wasserkreislauf, z. B. reichern sie die Grundwasservorräte an oder verändern den Wasserfluss und -abfluss (Bullock und Acreman, 2003). Ihre Renaturierung kann daher im Sinne ihrer wasserbezogenen Wirksamkeit mit entscheidend dafür sein, Wasser in der Landschaft zu halten und die lokale Wasserverfügbarkeit für Mensch und Natur zu erhöhen (Bullock und Acreman, 2003; Ramsar Convention on Wetlands, 2018). Nach Starkregenereignissen können Sümpfe und Marschen den Wasserfluss in der Landschaft regulieren und so vor Überschwemmungen und Erosion schützen, den Wasserfluss verlangsamen und überschüssiges Wasser speichern (Meli et al., 2014). Renaturierungsmaßnahmen können außerdem zu Nutzen in Form von verbesserter Nährstoffspeicherung und Wasserqualität führen (Singh et al., 2019).

Neben Einschränkungen in der Machbarkeit, die unabhängig vom Ökosystemtyp bei einer Renaturierung auftreten können, wie beispielsweise mögliche Landnutzungskonflikte oder die häufig sehr kostspielige Kontrolle invasiver Arten, stellt die Verfügbarkeit von Wasser eine grundlegende Herausforderung für die Renaturierung von Sümpfen und Marschen dar, insbesondere in ariden und semiariden Regionen (Weidlich et al., 2020; Maleki et al., 2018; Stapleton et al., 2023).

Diese Situation wird zusätzlich durch den Klimawandel und damit einhergehende regionale Änderungen, z. B. in Niederschlagsmengen und -mustern, verschärft (Kap. 2.2, 3.1.1). Dies kann zu zunehmenden Nutzungskonflikten um Wasserressourcen zwischen anderen menschlichen Bedarfen und der Renaturierungsmaßnahme führen, insbesondere im Hinblick auf die Landwirtschaft oder die Industrie. Daher lautet die wichtigste

Frage bei der Renaturierung, um der Komplexität und Variabilität dieser Ökosysteme in Zeit, Raum und insbesondere im Hinblick auf die zunehmenden Einflüsse des Klimawandels Rechnung zu tragen: Was kann oder wird das hydrologische Regime vor Ort jetzt und in der Zukunft beeinflussen? (Casanova et al., 2023). Auch die Bodenqualität kann sich limitierend auf die Renaturierung auswirken, z. B. bei verstärkter Erosion oder einer erhöhten Versalzung nach landwirtschaftlicher Nutzung (Zhao et al., 2021). Die unkontrollierte Einleitung von Wasser aus den Flüssen Tigris und Euphrat im Südirak nach dem zweiten Irakkrieg im Jahr 2003 hat z. B. einige ehemalige Sumpfgebiete teilweise wiederhergestellt. In anderen Gebieten scheiterte die Wiederherstellung an der hohen Versalzung von Boden und Wasser (Richardson et al., 2005).

Eine Renaturierung von Sümpfen und Marschen kann auch mit vielfältigen *Mehrgewinnen* einhergehen. Beide Lebensräume beherbergen etwa eine einzigartige, oft endemische Artenvielfalt und sind Rast- und Nahrungsplätze für wandernde Arten wie Zugvögel (Minckley et al., 2013; Vansteelant, 2023; Kačergytė et al., 2021). Darüber hinaus können eine Verbesserung von Wasser- und Bodenqualität sowie Hochwasserschutz die landwirtschaftliche Produktivität steigern (Tomscha et al., 2021). Eine Renaturierung trägt auch zur Erhaltung der Lebensgrundlage und der Kultur lokaler Gemeinschaften bei und kann zusätzlich Einnahmen z. B. aus Landschaftstourismus generieren (Ramsar Convention on Wetlands, 2018).

Die Renaturierung von Sümpfen und Marschen kann je nach Region auch *unbeabsichtigte Konsequenzen* haben, die vermieden werden sollten. Dazu gehört beispielsweise eine mögliche Veränderung des lokalen Wasserkreislaufs. Sie kann eintreten, wenn die Anpflanzung neuer

Vegetation die Evaporation und lokale Niederschlagsmuster verändert (te Wierik et al., 2021).

Weiterhin könnte eine möglicherweise fehlende wasserbezogene Wirksamkeit der Maßnahmen über das renaturierte Gebiet hinaus Auswirkungen für andere Nutzer und angrenzende Gebiete haben und somit auch die Erhaltung wichtiger menschlicher Lebensgrundlagen und die lokale Wirtschaft beeinträchtigen (z. B. Bring et al., 2022).

Daher müssen die Wassereinträge aus dem Einzugsgebiet, in dem die Maßnahme umgesetzt werden soll und insbesondere die Verbindungen mit anderen Feucht- und Trockensystemen bei der Planung berücksichtigt werden (Casanova et al., 2023). Die Ansiedlung ehemals heimischer Arten bzw. invasiver Arten kann Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung bzw. Artendynamik haben und zu Veränderungen der Ökosystemstruktur und -funktion führen (Weidlich et al., 2020; DeBerry und Hunter, 2024). Eine Renaturierung kann auch zu einer Freisetzung von im Boden gebundenen Nährstoffen und deren erhöhtem Eintrag in das Ökosystem führen, insbesondere wenn das Gebiet zuvor landwirtschaftlich intensiv genutzt wurde (Audet et al., 2020).

6.2.2.2

Beispiel Moore

Moore sind hoch spezialisierte Ökosysteme. Wesentliche Merkmale sind hohe Wassersättigung, die Ansammlung von organischem Material, vor allem Torf, sowie Nährstoffarmut. Moore sind weltweit zu finden, auch wenn sie in den borealen und gemäßigten Zonen besonders häufig sind. Aufgrund von Landnutzungsänderungen, z. B. Landwirtschaft oder Torfabbau, sind Moore stark gefährdet. Ihre Entwässerung ist für 5–10 % der jährlichen, globalen anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich (Loisel und Gallego-Sala, 2022). In Deutschland wurden bereits fast 90 % aller Moore trockengelegt. Die Restbestände der Moore, die etwa 4 % der Fläche Deutschlands einnehmen, befinden sich vor allem im norddeutschen Tiefland, d. h. nördlich des Harzes von Niedersachsen bis Mecklenburg-Vorpommern und südöstlich bis zum Erzgebirge in Sachsen, sowie südlich im Alpenvorland (BfN, 2024).

Degradiertere, d. h. zumeist entwässerte Moore werden durch Wiedervernässung renaturiert. Dies geschieht vor allem durch den Bau von Spundwänden, Dämmen und Deichen, die Wasser in der Fläche halten. Auch eine gezielte Ansiedlung von Ökosystemingenieuren wie Bibern oder eine manuelle Umsiedlung von Torfmoosen kann zur Moorrenaturierung beitragen (Law et al., 2017; Hugron et al., 2020).

Die wasserbezogene Wirksamkeit einer Renaturierung von Mooren liegt vor allem darin, dass große Mengen Wasser in der Fläche des Moores zurückgehalten werden. Moore wirken als natürlicher Schwamm und können aufgenommenes Wasser langsam wieder abgeben (Acreman und Holden, 2013). Damit können Moore zur Abmilderung von Hochwasser- und Starkregenereignissen und zur Stabilisierung des Grundwasserspiegels beitragen. Insbesondere in trockenen Perioden können sie zur Aufrechterhaltung der Wasserstände in Flüssen und Seen beitragen, womit sie auch die Sicherung der Wasserversorgung der im Umfeld der Moore lebenden Menschen und damit die Klimaresilienz unterstützen (Xu et al., 2018; Ritson et al., 2016; Gatis et al., 2023).

Die *Machbarkeit* einer Moorrenaturierung hängt zunächst von der Flächenverfügbarkeit ab. Da Moore zumeist für andere Formen der Landnutzung entwässert wurden, führt eine angestrebte Wiedervernässung in der Regel zu Landnutzungskonflikten. Betroffene Akteure sollten daher frühzeitig in die Planung der Wiedervernässung von Mooren einbezogen werden, um Lösungen zu finden, die ökologische sowie sozio-ökonomische Ziele gleichermaßen berücksichtigen und möglichst ausbalancieren (Fleming et al., 2021). Um Moore nachhaltig wieder zu vernässen, müssen Entwässerungssysteme wie Drainagen und Kanäle entfernt oder blockiert werden. Je nach örtlichen Gegebenheiten und regulatorischen Rahmenbedingungen müssen dafür Genehmigungen zum Rückbau von Entwässerungsmaßnahmen oder, falls unbedingt erforderlich, zum Bau technischer Infrastrukturen zum Wasserrückhalt eingeholt werden. Aus Kostengründen und um den Erfolg einer Moorrenaturierung wahrscheinlicher zu machen, sollten eingebrachte Baumaßnahmen zum Wasserrückhalt naturnah und dennoch robust gestaltet werden (Ritzema et al., 2014).

Eine grundlegende Voraussetzung für die Machbarkeit einer Moorrenaturierung ist die gesicherte Verfügbarkeit von Wasser adäquater Qualität. Neben der Landnutzung beeinflussen auch Auswirkungen des Klimawandels wie veränderte Niederschlagsmuster und Temperaturen eine Moorrenaturierung. In Regionen mit unzureichendem Niederschlag oder extremen Temperaturschwankungen kann es schwierig sein, permanent die für die Wiedervernässung notwendigen Wasserstände zu erzielen, um erneute Torfbildung und das Überleben der typischen Moorvegetation sicherzustellen. So ist in der Planung auch zu berücksichtigen, dass ökologische Prozesse in Mooren oft sehr langsam sind. Es kann Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte dauern, bis ein renaturiertes Moor wieder seine vollständige ökologische Funktionalität erlangt – oder zu einem neuartigen Ökosystem wird (Kreyling et al., 2021; Zak und McInnes, 2022).

Die Wiedervernässung von Mooren erfordert langfristiges Engagement und Monitoring (Strobl et al., 2019; Haapalehto et al., 2011). Beides ist notwendig, um bei *unbeabsichtigten Konsequenzen* wie interner Eutrophierung (Banaszuk et al., 2011) gegensteuern zu können und um *Mehrgewinne* zu realisieren. Neben ihrem Wert für das Wassermanagement haben Moore auch eine große Bedeutung für den Klimaschutz und die biologische Vielfalt.

Entwässerte Moore setzen erhebliche Mengen CO₂ frei, weil der im Torf gespeicherte Kohlenstoff bei Sauerstoffkontakt reagiert. Die Wiedervernässung von Mooren stoppt dies, beugt Bränden infolge von Selbstentzündung vor und kann durch neue Bildung von Torf Kohlenstoff binden. Damit hat die Renaturierung von Mooren einen unmittelbaren Klimaschutzeffekt. Ein dauerhafter Effekt ist darüber hinaus, dass Moore durch das Verlangsamen von Verdunstungsprozessen zur regionalen und globalen Klimaregulation beitragen (Helbig et al., 2020). Für die Biodiversität ist von großer Bedeutung, dass die Wiederherstellung natürlicher Wasserstände und Vegetationsmuster zu einer erhöhten strukturellen Vielfalt innerhalb der Moore führt. Dies schafft unterschiedliche Mikrohabitate, die verschiedenen Arten Lebensraum bieten (Strobl et al., 2019). So können Moore eine Vielzahl seltener und auf den Moorlebensraum hochspezialisierter Tier- und Pflanzenarten beherbergen. Innovative Ansätze wie Paludikulturen zeigen, wie auch zukünftig eine Nutzung von Mooren durch den Menschen ermöglicht und weitere Mehrgewinne erzielt werden können (Martens et al., 2023).

6.2.2.3

Beispiel Flusslandschaften, einschließlich Auen

Die Begradigung und Kanalisierung von Flussläufen sowie die damit verbundene Trockenlegung von Auenlandschaften spielen historisch eine wesentliche Rolle bei der steigenden Nutzung von Flussniederungen durch den Menschen und haben zur beschleunigten Entwässerung von Landschaften mit flussabwärts erhöhtem Überflutungsrisiko geführt (Wolf et al., 2021). Begradigung und Kanalisierung, u. a. auch für einen erleichterten Schiffsverkehr, führen durch beschleunigten Abfluss oder Rückstau bei Extremereignissen auch zu variablen Wasserständen, die sowohl Anrainer als auch viele Pflanzen- und Tierarten unter Stress setzt (van Veen und Sasidharan, 2021; Rollins-Smith und Le Sage, 2023). Zur Sicherung des Schiffsverkehrs wird der Wasserstand mittels Staustufen und Dämmen oft möglichst konstant gehalten. Staustufen sind allerdings Hindernisse für Fischwanderungen und verursachen bei Starkregenereignissen einen Rückstau des Wassers. Eine Studie aus dem Jahr 2020 zeigt, dass allein in 36 europäischen Ländern insgesamt etwa 1,2 Mio. Barrieren wie Dämme, Wehre, Furten und andere Flussbauwerke in Flussläufen bestehen (Belletti et al., 2020).

Extreme Beispiele der Nutzung von Fließgewässern sind Stauseen, die zur Sicherung der Wasserversorgung des Menschen mit Hilfe von Staudämmen gebildet werden und den natürlichen Flusslauf und damit auch die Verbindungen zwischen Ökosystemen für wandernde Arten und für den Genaustausch unterbrechen (Cid et al., 2022; Thieme et al., 2023).

Problematisch für die Ökosysteme in und an begradigten Flüssen und Bächen ist zunächst der Anstieg der Fließgeschwindigkeit, der die Gefahr einer Verdriftung, d. h. eines Mitreißens von Fauna und Flora flussabwärts und des Ausschwemmens von Nährstoffen und organischem Material mit sich bringt (Brown et al., 2018). Die Gewässerbaumaßnahmen führen auch zu Biodiversitätsverlusten durch Verlust von Lebensraumkomplexität, Beseitigung von überschwemmbarren Auwäldern und -wiesen, Galeriewäldern und ufernahen Sumpfböden, die als Wasserspeicher fungieren (Zhou und Endreny, 2020). Problematisch ist auch die Einengung des Flussbetts, die dem Fluss die Möglichkeit nimmt, die Landschaft periodisch zu überfluten und den Anstieg des Wasserstands auszugleichen. Wenn niederschlagsarme Zeiten zu niedrigeren Wasserständen führen, können randständige Ökosysteme austrocknen und absterben (Costello et al., 2022). Mit dem Verlust der Au- und Galeriewälder geht Beschattung verloren und kleinere Flüsse erwärmen sich (Parmesan et al., 2022). Diese Entwicklung wird durch den Klimawandel verstärkt, was großen Einfluss auf die Ausprägung der Lebensgemeinschaften hat. Kälteliebende werden durch wärmeliebende Arten verdrängt, die auch mit reduzierten Sauerstoffgehalten des Wassers zurechtkommen (Parmesan et al., 2022; Costello et al., 2022).

Die Wiederherstellung der Flusslandschaften hat zum Ziel, die negativen Auswirkungen auf Ökosysteme rückgängig zu machen, Multifunktionalität wiederherzustellen und, hinsichtlich der wasserbezogenen Wirksamkeit, den Wasserhaushalt zu stabilisieren (Wohl et al., 2015; Brown et al., 2018). Zentrale Maßnahmen sind die Beseitigung von Flussbauwerken und die Wiederherstellung natürlicher, mäandernder Flussläufe, je nach Flusstyp (z. B. in Niederungen oder Berglandschaften, in Städten oder in Agrarlandschaften) und je nach historischen Maßnahmen der Flussregulierung (RCC, 2024). Häufige Gründe für den Rückbau sind zunächst wirtschaftliche oder sicherheitsbedingte Überlegungen. Wenn auffällige Strukturen ausgebessert werden müssen, ist das in manchen Fällen kostspieliger als ihre Entfernung (Habel et al., 2020; Cornwall, 2023; Bellmore et al., 2019). Immer häufiger spielen auch ökologische Überlegungen wie die Wiederherstellung natürlicher Flussläufe und ihrer charakteristischen Ökosysteme und Artenzusammensetzung eine zentrale Rolle (Duda und Bellmore, 2022). Weltweit werden in den USA die meisten Dammrückbauprojekte durchgeführt (Cornwall, 2023). Auch im Entwurf der

EU-Wiederherstellungsverordnung sind Pläne verankert, um das Ziel der EU Biodiversitätsstrategie zu erreichen, bis 2030 mindestens 25.000 km frei fließende Flussläufe wiederherzustellen (DG ENV, 2023). Ziel ist, die Gesundheit und biologische Vielfalt der Flüsse wiederherzustellen und damit die Klimaresilienz zu stärken sowie wasserbezogene Risiken, z. B. durch Extremereignisse, für Gemeinden zu reduzieren. Dies ist allerdings nur innerhalb enger Anpassungsgrenzen möglich. Steht die Sicherung der Wasserversorgung im Vordergrund, sind nicht alle Stauseen und ihre Dämme für den Rückbau geeignet – es sei denn, es gibt alternative Wege der Wasserversorgung über große Distanzen, z. B. über Pipelines.

Die ökologischen Auswirkungen der Flussrenaturierung unterscheiden sich zeitlich, räumlich und je nach regionalem Kontext (Foley et al., 2017; Bellmore et al., 2019). Die Entfernung von Dämmen stellt kurzfristig eine Störung dar, von der sich die aquatischen und terrestrischen Ökosysteme aber zumeist mittel- bis langfristig wieder erholen können. Funktion und Zustand der zum Teil neu entstehenden Ökosysteme gleichen aber nicht immer dem Ausgangszustand. Es erfolgt ein Übergang von einem lentischen, also eher stehenden, tieferen Gewässer des Reservoirs vor dem Staudamm, zu einem lotischen, also fließenden Habitat, begleitet von einer veränderten Zusammensetzung der Artengemeinschaft (Foley et al., 2017; Bellmore et al., 2019; Duda und Bellmore, 2022). Die (Wieder-)Ansiedlung von Arten erfolgt durch die Wiederherstellung der räumlichen Konnektivität und Migrationsmöglichkeiten für im Fließgewässer wandernde Arten (Foley et al., 2017). Dies kann zu einem Anstieg der Artenvielfalt und ihrer Lebensstadien sowie der Verbreitung von Nährstoffen und organischen Stoffen führen,

was wiederum als wichtige *Mehrgewinne* die Resilienz und die Produktivität steigern kann. (Magilligan et al., 2021; Bellmore et al., 2019; Duda und Bellmore, 2022). Sollte es sich um ein ehemaliges Reservoir handeln, spielt neben der Entfernung des Staudamms auch die natürliche Revegetation bzw. die unterstützende Wiederbepflanzung der freiwerdenden Flächen und Hänge am renaturierten Fluss eine wichtige Rolle, auch zum Schutz vor Erosion (Duda und Bellmore, 2022).

Renaturierungsprojekte nach Rückbau der Dämme sollten womöglich gemeinsam mit Indigenen und lokalen Gemeinschaften sowie der lokalen Bevölkerung geplant und durchgeführt werden, wie z. B. beim Rückbau des Iron Gate Damm im Klamath River in den USA. So kann die langfristige Umsetzung von Renaturierungsprojekten gesichert werden (Habel et al., 2020; Cornwall, 2023; Matanzima und Mosuo-Tsietsi, 2023). Die Wiederherstellung ursprünglicher Nutzungen, ehemaliger Landschaftsbilder (ästhetischer Wert), der Produktivität der Gewässer, des Mikroklimas und die Wiederbesiedlung durch ursprüngliche Arten können *Mehrgewinne* für die Bevölkerung sein (Cornwall, 2023).

Die *Machbarkeit* eines Dammrückbaus hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Beispielsweise bestimmt u. a. die Sedimentation im Reservoir, welche geomorphologischen und ökologischen Auswirkungen ein Dammrückbau auf die Umgebung haben wird (Foley et al., 2017; Doyle et al., 2005). Die Freisetzung und Verteilung der angestauten Sedimente können positive ökologische Auswirkungen, z. B. über den Transport von Nährstoffen oder die Entstehung neuer Habitats im unteren Flusslauf, aber auch negative Konsequenzen haben, z. B. die Zerstörung von Habitats für andere Arten (Bednarek, 2001;



Abbildung 6.2-2

Beispiel für den Rückbau großer Staudämme (Elwha River, USA). Von 2011–2014 wurden im Elwha River (Washington, USA) zwei große Staudämme rückgebaut, der Elwha Dam (linkes Bild) und der Clines Canyon Dam. Hierdurch wurde das ursprüngliche Wasserregime auf über 70 km Flussverlauf wiederhergestellt. Die freigelegten Kiesbänke am ehemaligen Stausee Lake Aldwell (rechtes Bild) wurden im späteren Verlauf mit heimischer Flora bepflanzt (Roussel et al., 2024).

Quelle: Paul Cooper, CC BY-NC 2.0

Bellmore et al., 2019). Beispiel für eine *unbeabsichtigte Konsequenz* eines Dammrückbaus ist die Freisetzung PCB-kontaminierten Sediments am Fort Edward Damm im Hudson River im Jahr 1973 (Bednarek, 2001; Foley et al., 2017). Eine Möglichkeit zur besseren Steuerung der Sedimentmassen kann eine schrittweise Entfernung des Staudamms sein (Duda und Bellmore, 2022; Foley et al., 2017). Auch kann Sediment aktiv ausgehoben und entfernt werden, was allerdings den Zeitaufwand und die Projektkosten insbesondere bei besonders großen Staudammprojekten erhöhen kann (Duda und Bellmore, 2022). Wiederbepflanzung der freiwerdenden Flächen und Hänge am renaturierten Fluss spielen eine wichtige Rolle, auch zum Schutz vor Erosion (Duda und Bellmore, 2022; Abb. 6.2-2).

Die Erholung des Ökosystems nach Rückbau eines Damms hängt auch von der Wiederansiedlung unterschiedlicher Organismen ab. In manchen Fällen wird es nötig sein, bestimmte Arten und Ökosystemingenieure aktiv (wieder-)anzusiedeln (Bellmore et al., 2019). Gleichzeitig sollten *unbeabsichtigte Konsequenzen* bedacht werden. Beispielsweise kann die Entfernung von Staudämmen auch zur Verbreitung nicht heimischer und invasiver Arten führen (Bellmore et al., 2019; Duda und Bellmore, 2022). Es kann auch vorkommen, dass die Struktur und Funktion des Ökosystems nach den Renaturierungsmaßnahmen nicht dem Ausgangszustand entspricht (novel ecosystem; Foley et al., 2017). Zu den vielfältigen Auswirkungen des Rückbaus von Dämmen sowie zum Vergleich zwischen dem Ausgangszustand vor Bau eines Damms, dem ökologischen Zustand nach Dammbau und nach seiner Entfernung besteht weiterer Forschungsbedarf (Bellmore et al., 2019; Duda und Bellmore, 2022).

6.3 Lösungsraum Landwirtschaft

Weltweit steht die Landwirtschaft vor großen Herausforderungen: Sie soll Ernährung und Lebensunterhalt für Menschen vor Ort und für die Weltbevölkerung sichern, sich an den Klimawandel anpassen und zu dessen Begrenzung beitragen sowie Biodiversität und Ökosysteme (auch) als Grundlage der eigenen Produktivität schützen. Ressourcen wie Land und Wasser müssen geschickt genutzt werden, um Ernährungs-, Klima- und Biodiversitätsziele gleichzeitig zu erreichen. Für den Umgang mit Fläche und Biomasse u. a. in der Landwirtschaft hat der WBGU Mehrertragstrategien herausgearbeitet, die zu diesen drei Zielen beitragen und das „Trilemma der Landnutzung“ entschärfen können (WBGU, 2020). Auf ähnliche Weise und eng verzahnt mit den Ernährungs-, Klima- und Biodiversitätszielen

muss auch der Umgang mit Wasser – aus Niederschlägen, Oberflächen- und Grundwasser sowie Bodenfeuchte – in der Landwirtschaft gestaltet werden. So muss bei z. T. wasserintensiven Anpassungen zur Ernährungssicherung ausreichend Wasser für Ökosysteme und zukünftige Nutzungen genauso erhalten bleiben, wie der Einfluss der Landwirtschaft auf lokale Wasserhaushalte berücksichtigt werden muss.

Dafür müssen in der Landschaftsplanung Kompromisse und Synergien zwischen Agrarflächen mit verschiedener Nutzungs- und Eingriffsintensität in den Wasserhaushalt auf der einen sowie Renaturierungs- und Naturflächen bzw. ihrem Wasserbedarf und wasserbezogenen Ökosystemleistungen auf der anderen Seite gefunden werden (Kap. 6.1, 6.5). Außerdem muss eine klimaresiliente Landwirtschaft nicht nur im Anbau von Nutzpflanzen mit Schwankungen des Wasserdargebots umgehen, sondern auch Puffer für verfügbares Wasser in der Landschaft erhalten und schaffen, z. B. durch naturnahe Gewässer, Auen, Hecken, Bäume und in Böden. Landwirt:innen sind automatisch auch Grünwasserwirte und sollten künftig auch in dieser Rolle betrachtet, stärker unterstützt und eingebunden werden, damit sie ihren Pflichten zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen, der Biodiversität von Böden, Grasland, Wäldern und aquatischen Ökosystemen nachkommen können.

Handlungsbedarf besteht außerdem bezüglich der Erhebung besserer Daten und Projektionen zu Wasserentnahmen und -dargebot sowie der Ausweitung des Wissens zu Anpassungsmaßnahmen. Um die entsprechenden Transformationen zu erleichtern sind oft finanzielle Anreize nötig. Geeignete Beispiele sind Ausgleichsmechanismen zwischen den Landwirt:innen und anderen Wassernutzern, etwa Wasserfonds, Reformen wasserbezogener landwirtschaftlicher Subventionen und existenzsichernde Angebote für den transformativen Übergang oder umfassendere Entnahmeentgelte. Hier sind Details der Ausgestaltung zum Teil noch unzureichend erforscht. Schließlich sollte das zukünftige Potenzial von Anpassungsmaßnahmen für die Reduktion von Klimarisiken besser untersucht werden.

Dieses Kapitel fokussiert auf den wasserbezogenen Gestaltungsbedarf in der Landwirtschaft. Da sie Teil lokaler und globaler Stoffströme ist, liegen auch in weiteren landwirtschaftlichen Praktiken sowie in den Ernährungs- und Energiesystemen, in die sie eingebettet sind, weitere wesentliche Hebel für den Schutz der Wasser- und anderer Ressourcen, des Klimas und der Biodiversität sowie der Ernährungssicherung für alle Menschen (WBGU, 2020). Diese sollten immer mitgedacht werden.

6.3.1

Eingriffe der Landwirtschaft in den Wasserhaushalt

Die Landwirtschaft ist stark vom Klimawandel und wasserbezogenen Klimarisiken betroffen (Caretta et al., 2022; Kap. 3.1). Dementsprechend muss sie sich wasser-schonend anpassen und gleichzeitig alle ihre Praktiken auf Klima- und Biodiversitätstauglichkeit prüfen. Viele Anpassungsmaßnahmen beeinflussen den Verbrauch von blauem Wasser, z. B. durch Bewässerung als Reaktion auf steigende Temperaturen und Verdunstung oder auf lokal abnehmende Niederschläge. Bisherige und auch angepasste landwirtschaftliche Praktiken beeinflussen aber auch selbst den Wasserhaushalt bzw. das Wasserdargebot (z. B. über grünes Wasser) und damit auch den Spielraum weiterer Anpassungsmöglichkeiten:

Auf rund 80 % der weltweiten Agrarflächen wird Regenfeldbau betrieben (UNESCO, 2024). Ob Niederschlag versickert oder abfließt, verdunstet oder in Böden und Pflanzen gespeichert wird, hängt von ganz unterschiedlichen Faktoren ab. Dazu gehören das natürliche Relief, veränderliche landschaftliche Strukturen wie Brachflächen, Hecken, Bäume und Auen, gepflanzte Feldfrüchte sowie landwirtschaftliche Methoden, die unter anderem Bodenbeschaffenheit und -bedeckung beeinflussen.

Zum Teil werden feuchte Böden für die landwirtschaftliche Nutzung entwässert, bis hin zur Trockenlegung von Moorböden. Beispielsweise unterliegen in Nordwesteuropa und den USA nach älteren Schätzungen

ein Drittel bzw. 17–30 % der landwirtschaftlichen Flächen Entwässerungsaktivitäten (Gramlich et al., 2018). Neben natürlichen Wasserspeichern in der Landschaft gehen dadurch auch Feuchtgebiete verloren. Im Fall von Mooren werden zusätzlich große Mengen an im Boden gespeichertem Kohlenstoff in Form von CO₂ freigesetzt (Kap. 6.2). Die landwirtschaftliche Nutzung entwässerter Moorböden, vor allem die Beweidung durch Wiederkäuer oder das Anpflanzen standortfremder Energiepflanzen, ist ebenfalls für den Klimaschutz kontraproduktiv.

Etwa 20 % der Agrarflächen weltweit werden aus verschiedenen Oberflächen- und Grundwasserkörpern bewässert, hier werden 40 % der landwirtschaftlichen Produktion erzeugt (UNESCO, 2024). Umleitungen und übermäßige Wasserentnahmen tragen aber (neben Verschmutzung und Eingriffen wie z. B. für Energieerzeugung und Schiffbarkeit) dazu bei, dass 56 % der Fließgewässer und 44 % der Seen in der EU in keinem guten ökologischen Zustand sind. Einige Fließgewässer fallen saisonal trocken, die Pegel von Seen und künstlichen Reservoirs und Grundwasserspiegel sinken (EEA, 2021; Kap. 2.2).

Zu den Herausforderungen für die Landwirtschaft durch den Klimawandel gehören veränderte regionale Niederschlags- und Verdunstungsmuster; neben stärkeren Schwankungen und Extremen sind lokal auch Veränderungen der Mittelwerte oft noch mit hohen Unsicherheiten behaftet (Caretta et al., 2022). Die Existenzsicherung einer Landwirtschaft, in der grundsätzliche Veränderungen nötig sind, und der Landwirt:innen gewinnt vor diesem Hintergrund besondere Bedeutung.

Kasten 6.3-1

Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte

Unter Wasser- und Bodenfeuchteerhaltung (water and soil moisture conservation) versteht der IPCC (Caretta et al., 2022; Tab. 6.3-1) Anpassungsmaßnahmen wie Terrassierung, Mulchen und Konturpflügen (entlang von Höhenlinien) oder die Speicherung von Wasser in Sand, der sich durch spezielle Dämme in temporär wasserführenden Flussbetten ansammelt (Stern und Stern, 2011). Es gibt große Schnittmengen mit den von der Welternährungsorganisation unter Soil and Water Conservation zusammengefassten Techniken und Praktiken (FAO, 2024b), die die Erosion, Verdichtung und Versalzung von Böden verhindern sowie die Wasserspeicherung in Böden und die Bodenfruchtbarkeit verbessern sollen. Beispielsweise wird durch Terrassierung der Oberflächenabfluss verlangsamt bzw. reduziert, Bodenerosion verringert und die Wasserinfiltration erhöht (Deng et al., 2021). Die wasserbezogene Wirksamkeit von Terrassen als Puffer bei langanhaltender Trockenheit konnten etwa während einer Dürre in Äthiopien 2015 nachgewiesen werden (Kosmowski, 2018). Nachteilig kann eine mit der Terrassierung einhergehende Verringerung der Anbaufläche sein, die unter Umständen zu Ertragsseinbußen führen kann.

Einflüsse von Terrassierungen auf den Wasserkreislauf und insbesondere Oberflächenabflüsse müssen durch großräumigere Anpassungskonzepte berücksichtigt werden. Schlecht gebaute Stufen können abrutschen und die Bodenerosion erhöhen. Mehrgewinne ergeben sich durch die höhere landschaftliche Heterogenität. Sie schafft Lebensräume, erleichtert die Symbiose von Organismen und hilft beim Erhalt biologischer Vielfalt (Deng et al., 2021).

Beim Mulchen mit Reststoffen des Ackerbaus können Zielkonflikte z. B. mit der Verwendung der Reststoffe als Viehfutter entstehen, was die Machbarkeit bzw. Implementierung dieser Maßnahme behindern kann (Giller et al., 2009). Da die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Erhaltung von Wasser- und Bodenfeuchte in hohem Maße kontextabhängig ist, müssen sie stets an die lokalen agrarökologischen und sozioökonomischen Bedingungen angepasst werden (Caretta et al., 2022). Nur so können sie zu einem nachhaltigen Landmanagement mit langfristiger landwirtschaftlicher Produktivität und Umweltgesundheit wichtige Beiträge leisten. Jenseits von 1,5 °C Erwärmung nimmt ihre Wirksamkeit relativ zu den zunehmenden Wasserrisiken allerdings deutlich ab (Caretta et al., 2022; Abb. 6.3-2). Ihre Effektivität kann jedoch durch die Kombination mit anderen Maßnahmen gesteigert werden.

6.3.2

Angepasste Anbauweisen mit grünwasser-bezogenen Maßnahmen kombinieren

Für eine klimaresiliente Landwirtschaft muss der Anbau flexibler und robuster gegenüber Schwankungen im Wasserdargebot werden. Weiterhin muss die Landwirtschaft selbst dazu beitragen, Puffer für verfügbares Wasser in der Landschaft und Grundwasserkörpern zu erhalten und zu schaffen. Dies können natürliche, technische oder Hybridlösungen sein. Die Ansätze sind vielfältig und lokal spezifisch.

Zu den Anpassungen im Nutzpflanzenanbau gehören (1) die Verbesserung von Anbausorten und agronomische Praktiken, z. B. der Umstieg auf dürreresistentere Sorten oder angepasste Düngermanagement; (2) Änderungen in Anbausystemen und -methoden, etwa andere Zeitpunkte für die Aussaat und Diversifizierung der

Nutzpflanzen; sowie (3) effiziente Bewässerung und Wassermanagement im landwirtschaftlichen Betrieb, z. B. Tröpfchenbewässerung bzw. das lokale Sammeln und Speichern überschüssiger Niederschläge in Teichen, Rückhaltebecken oder Zisternen; alternativ und ggf. besser können diese in natürliche Vegetationszonen und lokale Gewässer geleitet werden, wo sie auch den regionalen hydrologischen Kreislauf oder auch Televerbindungen zwischen weiter voneinander entfernten Orten stärken bzw. wiederherstellen. Zum Teil können auch Grundwasserspeicher gezielt wieder angereichert werden (managed aquifer recharge; Zhang et al., 2020).

Direkte Beiträge zum Wasserhaushalt in der Landschaft, vor allem zu grünem Wasser, leisten (4) Maßnahmen zur Erhaltung der Feuchte und Wasserspeicherfähigkeit von Böden sowie zur gezielten Veränderung von Oberflächenabfluss, Versickerung und Verdunstung (Kasten 6.3-1). Dazu gehört z. B. die Verbesserung der Bodenbedeckung

Kasten 6.3-2

Agroforstwirtschaft

Agroforstwirtschaft reduziert durch Beschattung und Windwiderstand den Hitzestress von Kulturpflanzen und den Wasserverlust durch Verdunstung. Ebenso erhält Waldweide den Wassergehalt in Böden von Graslandschaften und bietet Tierbeständen Schutz vor Hitzestress. Mehrgewinne konnten Agroforstmaßnahmen z. B. in Brasilien realisieren, wo sie zu einer Wertsteigerung von Land führten (Schembergue et al., 2017).

In ariden und semiariden Regionen Lateinamerikas konnten Agroforstmaßnahmen den Einsatz von Düngemitteln und anderem landwirtschaftlichem Input reduzieren, was Kosten und übermäßigen Nähr- und Schadstoffeintrag in Grund- und

Oberflächenwasser verringerte (Krishnamurthy et al., 2019). Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird als hoch eingeschätzt, jedoch nur bei einer Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf 2 °C (Caretta et al., 2022).

Unbeabsichtigte negative Konsequenzen auf Land- und Wasserressourcen können sich bei Agroforstmaßnahmen insbesondere durch die Anpflanzung von Arten ergeben, die nicht an den jeweiligen Standort angepasst sind (Etongo et al., 2015). Gleiches gilt für die Anpflanzung von Arten, deren Wasserverbrauch besonders hoch ist (Krishnamurthy et al., 2019). Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der multidimensionalen Beurteilung der Wirksamkeit und der kontextspezifischen Analyse von Eignung und Machbarkeit. Zwei Beispiele für Agroforstwirtschaft sind in Abb. 6.3-1 dargestellt.



Abbildung 6.3-1

Beispiele für Agroforstwirtschaft. Links: Zwischenfruchtanbau von Napiergras in einem Agroforstsystem auf Kokosnussbasis in Tumkur, Karnataka (Indien). Rechts: Für semiaride Verhältnisse geeignetes Agroforstsystem auf der Basis von Zizyphus und Aloe Vera in Agra, Uttar Pradesh (Indien).

Quelle: World Agroforestry Centre/S.K. Dalal, CC BY-NC-SA 2.0 (links); World Agroforestry Centre/Devashree Nayak, CC BY-NC-SA 2.0 (rechts)

durch Mulchen, Untersaaten oder Zwischenkulturen, die auch die Oberflächen- und Bodenbeschaffenheit verbessern, reduziertes Pflügen oder ein am natürlichen Relief orientierter Anbau bis hin zum Anlegen von Terrassen. Die Entwässerung feuchter Böden sollte reduziert und vor allem bei Moorböden gestoppt und rückgängig gemacht werden (Kap. 6.2.2). Eine Umwidmung zur nachhaltigen Nutzung kann Paludikultur, z. B. Gewinnung von Schilf, Seggen, Binsen, Rohrglanzgras in Niedermooren, auch für die Biogasgewinnung oder den Anbau spezieller Moorpflanzen wie Preiselbeeren in Hochmooren beinhalten. Der Wegfall von Entwässerungsmaßnahmen kann die Resilienz gegenüber Dürren auch auf benachbarten Flächen erhöhen. Schließlich kann (5) die Bewirtschaftung kleinräumiger, mit Landschaftselementen wie Hecken und Bäumen ausgestatteten Kulturlandschaften z. B. in der Agroforstwirtschaft (Kasten 6.3-2) Wasserpuffer schaffen und durch Beschattung und Windwiderstand

die Verdunstung sowie den Hitzestress von Nutzpflanzen, Tieren und Menschen reduzieren.

Einzelne Maßnahmen werden auf Ebene landwirtschaftlicher Betriebe meist kombiniert, und diese Kombinationen in der Literatur unter verschiedenen (nicht immer gleich und eindeutig definierten) Begriffen analysiert. Beispielsweise beinhaltet „conservation agriculture“ zur Verbesserung von Bodenqualität und -feuchte meist reduziertes Pflügen, erhöhte Bodenbedeckung vor allem durch Mulchen sowie Fruchtwechsel (Twomlow et al., 2008; Thierfelder et al., 2015), wobei die jeweiligen Effekte dieser Komponenten – und ggf. zusätzlicher Pestizid- oder Düngereinsätze – sorgfältig unterschieden werden sollten (Giller et al., 2009). Konzepte der regenerativen Landwirtschaft betonen unter anderem Bodengesundheit und landwirtschaftliche Biodiversität und kombinieren dafür z. B. Praktiken für Bodenqualität und -feuchte, lokale Nährstoffkreisläufe sowie aus

Tabelle 6.3-1

Beispiele für wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen in fünf Kategorien. Die gleichen Kategorien werden auch in Abb. 6.3-2 verwendet.

Quelle: Basierend auf Teilen von Tabelle 4.8 in Caretta et al., 2022

Art der Anpassung	Beschreibung und Beispiele
1. Verbesserte Sorten und Anbauverfahren	> Verbesserte Anbausorten, z. B. Rohreisvarianten mit kurzer Vegetationszeit (Nepal); salztolerante Reissorten (Bangladesch); dürretolerante Maisvarianten (Malawi, Nigeria, Zimbabwe, Uganda) > Verbesserte agronomische Praktiken, z. B. conservation agriculture (vor allem Minimierung der Bodenstörung, bessere Bodenbedeckung, Fruchtwechsel) um Bodenfeuchte zu erhalten (Malawi, Tansania); klimasmarte Landwirtschaft (Zambia); abwechselndes Bewässern und Trocknen und Direktaussaat von Reis (Indien)
2. Änderungen bei Nutzpflanzen, Anbausystemen und -methoden	> Andere Anbaumuster und Nutzpflanzen: Einführung von Zuckerrohr und Reis (Costa Rica); Diversifizierung der Anbaukulturen (Äthiopien, Zimbabwe, Tansania) > Veränderte Zeitpunkte für Aussaat und Ernte (z. B. China, Indien, Pakistan) > Diversifizierung im landwirtschaftlichen Betrieb, z. B. integrierte Ackerbau-Viehhaltungssysteme (Frankreich)
3. Bewässerung und Wassermanagement	> Bewässerung, z. B. Anlagen lokaler Bewässerungsinfrastruktur (Chile); Finanzierung von Gemeinschaftsbrunnen (Canada); Bohrbrunnen (Thailand); Flutbewässerung (spate irrigation, Sudan); nächtliche Bewässerung zur Reduktion der Verdunstung (UK) > Wassermanagement und wassersparende Technologien im landwirtschaftlichen Betrieb, z. B. Oberflächenrohre zum Transport von Bewässerungswasser (China); Tröpfchenbewässerung (China); Wassersparmaßnahmen (Indien)
4. Erhaltung von Wasser und Bodenfeuchte	> Wasser- und Bodenfeuchteerhaltung im landwirtschaftlichen Betrieb (z. B. Burkina Faso); Terrassen und Erdwälle entlang von Höhenlinien (contour bunds, Äthiopien) > Wassersammlung und -speicherung durch Sanddämme (Kenia); in-situ- und ex-situ-Wassersammlung (Uganda, Indien) > Erhaltungsprogramme für Gewässereinzugsgebiete (z. B. Äthiopien) > Wiederherstellung von Wasserkörpern, z. B. Anlegen künstlicher Seen (Portugal)
5. Agroforstwirtschaft und forstwirtschaftliche Ansätze	> Agroforstwirtschaftliche Maßnahmen (Indien, Kenia, Nigeria); farmer-managed natural regeneration (FMNR; Ghana) > Forstwirtschaftliche Maßnahmen, z. B. Küstenaufforstung durch Pflanzen salzresistenter Bäume (Bangladesch, Kolumbien)

der Agroforstwirtschaft (Giller et al., 2021; Schreefel et al., 2020; Elevitch et al., 2018). Beispiele gibt es auch in Brandenburg (Gut und Bösel, 2024), wo die Flächen eines entsprechenden, unter anderem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Reallabors auch Teil des Global Network of Ecohydrology Demonstration Sites des UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme sind (Finck Stiftung, 2024a, b). Diese beiden und weitere Konzepte werden z. T. auch unter dem Stichwort „naturbasierte Lösungen“ zusammengefasst (Budding Polo-Ballinas et al., 2022).

Schließlich sind einzelne landwirtschaftliche Betriebe und Flächen im Kontext der Landschaft zu betrachten. Kleinräumige, diversifizierte Agrarflächen und ihre wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen sollten im Sinne eines Mosaikansatzes in einen integrierten Landschaftsansatz eingebettet werden (WBGU, 2020, 2024).

Der IPCC hat in seinem jüngsten Bericht die Evidenz zu wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen ausgewertet, die meisten davon in der Landwirtschaft (Caretta et al., 2022; Tab. 6.3-1). Dabei wurden sowohl heutige positive Effekte und ggf. Fehlanpassungen, als auch ihre erwartete

Effektivität bei der Reduktion zukünftiger lokaler Risiken abhängig von der Stärke der Erderwärmung betrachtet (Abb. 6.3-2)

Die wasserbezogenen Effekte des Klimawandels, Herausforderungen und nötigen Anpassungen sind lokal sehr unterschiedlich. Insgesamt zeigt sich (Abb. 6.3-2, linke Hälfte), dass wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen unter heutigen Bedingungen positive wasserbezogene Wirkungen und weitere Mehrgewinne bieten können. Sie haben positive Effekte wirtschaftlicher Art (vor allem in Niedrig- und Mitteleinkommensländern; nicht in der Abbildung), für vulnerable Bevölkerungsgruppen, auf den Wasserhaushalt und die Umwelt (vor allem in Hocheinkommensländern) sowie in institutioneller und soziokultureller Hinsicht (Caretta et al., 2022: 635 ff; Abb. 6.3-2). Beispiele umfassen die Erhöhung des landwirtschaftlichen Ertrags und des Haushaltseinkommens durch den Anbau von dürrerotoleranten Maisvarianten durch Kleinbauern in Zimbabwe (Makate et al., 2017) oder die zeitliche Anpassung der Weizenaussaat in Pakistan (Rahut und Ali, 2017). Ob und in welchem Umfang heutige Anpassungsmaßnahmen auch bei fortgesetztem Klimawandel noch

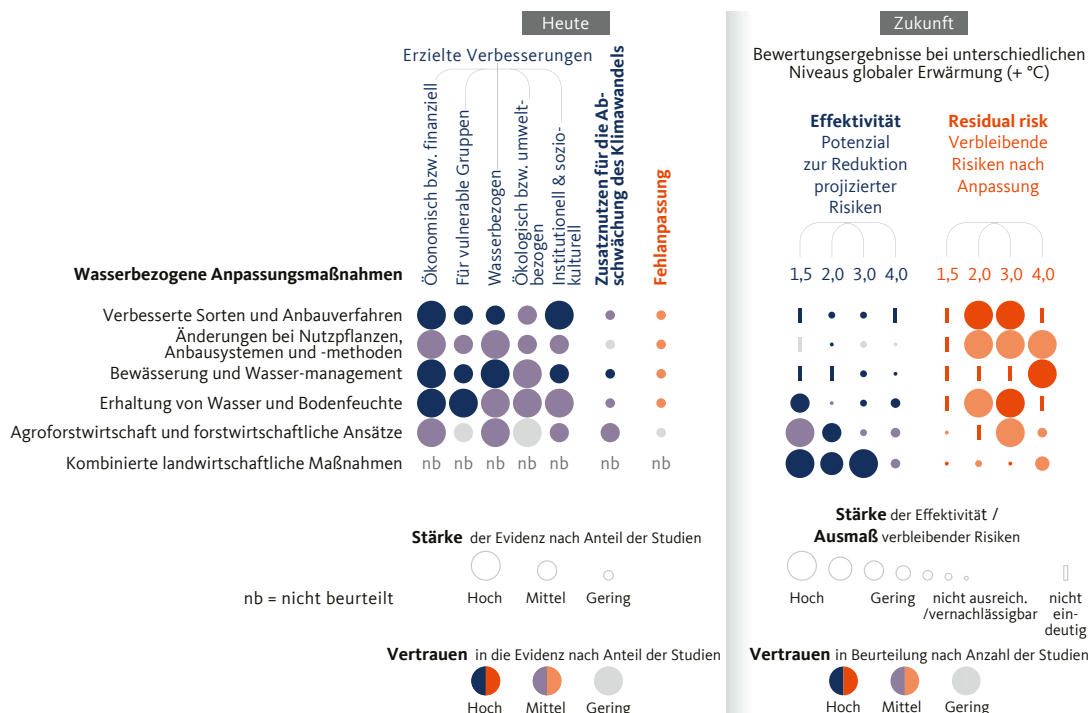


Abbildung 6.3-2

Heutige und zukünftige Wirksamkeit wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft. Linke Seite: gegenwärtige positive Wirkungen und Mehrgewinne, auch für den Klimaschutz, sowie Fehlanpassungen. Rechte Seite: zukünftige Wirksamkeit/Effektivität der Anpassungsmaßnahmen und verbleibendes Risiko durch Klimawandelfolgen für verschieden starke Erderwärmung. Unsicherheiten in der Bewertung und Risiken nehmen jenseits von 1,5 °C globaler Erwärmung deutlich zu.

Quelle: Caretta et al., 2022 (Ausschnitt)

Mehrgewinne erbringen, ist nicht gut untersucht. Zudem weisen ethnologische Arbeiten zum Umgang mit dem Klimawandel zunehmend darauf hin, dass aus lokalen Wissenssystemen heraus entwickelte Lösungsstrategien, wie beispielsweise das Anpassen des landwirtschaftlichen Kalenders oder die Verlagerung der Viehzucht zum Schutz gegen plötzliche Überschwemmungen, in der Regel zwar kurzfristige Bewältigung (short-term coping) ermöglichen, aber keine langfristige Anpassung und sukzessive Transformation des gesamten Produktionssystems in Richtung Klimaresilienz erreichen (Oladele und Amara, 2024; Makate, 2020; Crate und Nuttall, 2009; Hornidge und Scholtes, 2011). Gleichzeitig unterstreichen Forschungsarbeiten wiederholt, dass nationale Anpassungsstrategien vieler Länder, beispielsweise in Subsahara-Afrika, das Potenzial lokaler Wissenssysteme in der Transformation der Landwirtschaft weiterhin unzureichend nutzen. Eine stärkere Integration lokaler Wissenssysteme in die Entwicklung von Anpassungsstrategien für erhöhte Klimaresilienz ist zu empfehlen (Filho et al., 2023).

Vor allem bei Ansätzen, die zur Anpassung auf eine Steigerung der Einkommen und dabei primär auf eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion setzen, treten teilweise auch unbeabsichtigte negative Effekte bzw. Fehlanpassungen auf. Dazu gehören eine Übernutzung des Grundwassers, erhöhte Kosten und eine stärkere Nutzung von synthetischen Düngern und Pestiziden (Caretta et al., 2022: 643). Beispielsweise stellt eine Studie aus Tunesien fest, dass die Anpflanzung von Olivenbäumen in einem bisher von Gerstenanbau und Viehhaltung dominierten Gebiet als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel zwar profitabel für die Landwirt:innen wäre, die notwendige Bewässerung jedoch das Grundwasser übernutzen würde. Als alternative Anpassungsmaßnahme könnte ein Zwischenfruchtanbau mit Kakteen, die als Wasserquelle für Vieh dienen und zur Verringerung der Bodenerosion beitragen können, die Einkommen der Bauern ebenfalls verbessern, ohne die Wassernutzung zu erhöhen (Daly-Hassen et al., 2019).

Dies illustriert (Abb. 6.3-2, unterste Zeile), dass zukünftig Einzelmaßnahmen oft nicht ausreichen werden, um Risiken in der Landwirtschaft ausreichend zu reduzieren. In der Regel werden Kombinationen von Maßnahmen notwendig sein, die letztendlich in eine ganzheitlich ökologisch-nachhaltige Landwirtschaft und einen integrierten Landschaftsansatz eingebettet werden müssen (WBGU, 2020). Die Wirksamkeit verschiedener Anpassungsansätze ist stark vom jeweiligen Ort und Kontext sowie den eingesetzten Kulturpflanzen abhängig (Caretta et al., 2022: 647).

Außerdem zeigt sich (Abb. 6.3-2, rechte Hälfte), dass die zukünftige Wirksamkeit bzw. Potenziale der genannten Ansätze, die Risiken zukünftigen Klimawandels zu reduzieren, begrenzt sind. Aufgrund der verschärften

Wasser- und Temperaturextreme bei zunehmender Erwärmung werden die möglichen Beiträge sogar weiter abnehmen und selbst nach deren Umsetzung ist mit erheblichen Restrisiken zu rechnen (Caretta et al., 2022). Dies gilt insbesondere für auf verbesserten Nutzpflanzenanbau und Bewässerung abzielende Anpassungsmaßnahmen. Aber auch Maßnahmen für verbesserte Bodenfeuchte und aus dem Bereich der Agroforstwirtschaft, die bis 1,5 °C bzw. 2 °C Erwärmung die größten Potenziale zeigen, werden bei einem stärkeren Anstieg der Temperatur voraussichtlich deutlich weniger effektiv (Zeilen 1–2 bzw. 4–5 in Tab. 6.3-1 und Abb. 6.3-2).

6.3.3

Landwirt:innen sind auch Grünwasserwirt:innen – Handlungsbereiche zur Umsetzung

Die Ansätze für eine verbesserte Bewirtschaftung des Wassers und Anpassung an den Klimawandel sind im Kern überwiegend bekannt. Manche werden in bestimmten Regionen schon lange und großflächig angewendet und können ggf. auf andere Gebiete übertragen werden, auch wenn zu Potenzialen, Grenzen, Übertragbarkeit und Verbesserungsmöglichkeiten im Einzelfall noch Forschungsbedarf besteht. Um sie in die Fläche zu bringen, sollten Maßnahmen u. a. in den folgenden vier Bereichen ergriffen werden (spezifische Handlungs- und Forschungsempfehlungen folgen in Kap. 6.5.3 und 6.6.3):

Wissen, Expertisen und Daten: Viele der Maßnahmen liegen im Eigeninteresse und grundsätzlich auch im Einflussbereich des einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs, entsprechende Informationen sowie Fähigkeiten vorausgesetzt. Relevante Dargebots- und Entnahmedaten und Projektionen des Wasserdargebots sollten gesammelt bzw. laufend erstellt und Landwirt:innen zur Verfügung gestellt werden. Auch sollte Wissen zu Anpassungsmöglichkeiten vermittelt werden. Bei Bewässerungsmaßnahmen mit gemeinschaftlich genutzten Wasserressourcen ist zusätzlich die Erfassung der Entnahmen (möglichst in Echtzeit, mit digitalen Mitteln) und nach Möglichkeit auch der Rückflüsse und damit des tatsächlichen Verbrauchs notwendig. Die Daten dienen als Grundlage für ein effektives Management, eine eventuelle Regulierung und ggf. Bepreisung der Entnahmen, die mit finanzieller Unterstützung und Förderung eines nachhaltigen Umgangs mit Wasser kombiniert werden können (siehe unten). Auf dieser Basis können der Gesamtwasserverbrauch erfasst und Anreize sowohl für effiziente Bewässerung gesetzt werden, als auch für ein effektiveres Management von Niederschlagswasser durch die Verringerung der Oberflächenabflüsse und Verbesserung der Wasserspeicherung in Böden und Landschaftselementen wie Hecken, Teichen oder Rückhaltebecken.

Bei Effizienzsteigerungen sollten allerdings Rebound-Effekte antizipiert und ggf. durch Regulierung adressiert werden (Grafton et al., 2018). Effizienzsteigerungen allein haben z. B. bei Bewässerungsmaßnahmen in vielen Fällen nicht zu einer signifikanten Reduktion des landwirtschaftlichen Gesamtwasserverbrauchs geführt, in manchen Fällen wurde sogar eine Erhöhung des Verbrauchs beobachtet. Dies liegt daran, dass Effizienzgewinne nicht für Einsparungen, sondern für Ertragssteigerungen genutzt werden. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise die Produktivität bisher durch Wassermangel beschränkt war, wasserintensivere Kulturen angebaut werden oder größere Flächen bebaut oder bewässert werden (Grafton et al., 2018; Perry et al., 2017; Hamidov et al., 2022; Xu et al., 2021b).

Landwirtschaft als Grünwasserwirtschaft wertschätzen und in integriertes Landschafts- und Wassermanagement einbinden: Von Anpassungsmaßnahmen, die Wasserhaushalt und -qualität in größerem Maßstab beeinflussen, z. B. durch Schaffung von Puffern, höhere Grundwasserneubildung oder Erhaltung von Ökosystemleistungen, profitieren auch andere Wassernutzer oder die Allgemeinheit. Positive Nebeneffekte sind beispielsweise der Schutz von Gebäuden und Infrastruktur vor Extremereignissen, die Erhaltung von Biodiversität und Erholungsräumen sowie lokale Klimaregulierung.

Landnutzer sollten daher stärker als Wasserakteure verstanden werden. Vor allem Landwirt:innen, die unweigerlich auch „Grünwasserwirt:innen“ sind, sollten in dieser Rolle stärker unterstützt werden. Dies sollte sich im politischen und gesellschaftlichen Umgang mit bzw. der Wertschätzung für die Landwirtschaft, in der Aus- und Fortbildung der Landwirt:innen sowie in ihrer Einbindung in Wassermanagementprozesse (Kap. 8.2, 8.3.3) und in wasserbezogenen finanziellen Anreizen widerspiegeln (siehe unten). Umgekehrt kann es sinnvoll sein, klassische Wasserakteure wie Wasserversorger oder

Wasserbehörden in eine grundlegende Transformation des Umgangs mit Land und der Landwirtschaft (WBGU, 2020) stärker einzubinden, da wasserbezogene Mehrgewinne einer solchen Umgestaltung z. T. relativ „greifbar“ sind.

Finanzielle Anreize und Absicherung der Transformation: Damit Landwirt:innen in ausreichendem Umfang aktiv werden können, sollten neben einer eventuellen Regulierung des Verbrauchs positive finanzielle Anreize verstärkt werden. In Ländern mittleren und niedrigen Einkommens muss z. T. überhaupt erst ausreichender Zugang zu Ressourcen und Kapital geschaffen werden. Dazu gehören erstens Ausgleichsmechanismen zwischen den Landwirt:innen und den Nutznießern der Erhaltung und Verbesserung der Wasserressourcen, etwa Wasserfonds (Kap. 8.3.3). Transformative Anpassungsmaßnahmen entfalten ihre Wirksamkeit allerdings z. T. erst über einen längeren Zeithorizont, und ein Teil Wirkung besteht in Mehrgewinnen für die Allgemeinheit, die nicht unmittelbar zu Einnahmen bei Landwirt:innen führen. Um Anschub- bzw. Überbrückungsfinanzierung bereitzustellen und z. B. die Bereitstellung von Ökosystemleistungen zu entlohnen, können daher zweitens wasserbezogene landwirtschaftliche Subventionen in diese Ausgleichsmechanismen eingebunden oder separat gezahlt werden; diese sollten aber in jedem Fall an öffentliche Güter und die transformative Umgestaltung gebunden werden. Beispielsweise wurden in Kenia, Marokko, China und Algerien „Green Water Credit“-Fonds entwickelt, aus denen Landwirt:innen für wasserbezogene Maßnahmen Zahlungen erhalten und flussabwärts liegende Nutzer wie Wasserversorger oder Energieerzeuger einzahlen, ergänzt durch öffentliche Mittel und Entwicklungsfinanzierung (ISRIC, 2024; Abb. 6.3-3). Auch die Trinkwasserversorger deutscher Städte leisten z. T. Ausgleichszahlungen an Landwirt:innen für wasserbezogene Maßnahmen, etwa in Augsburg (swa, 2021; Kap. 8.3.3). Drittens sollten

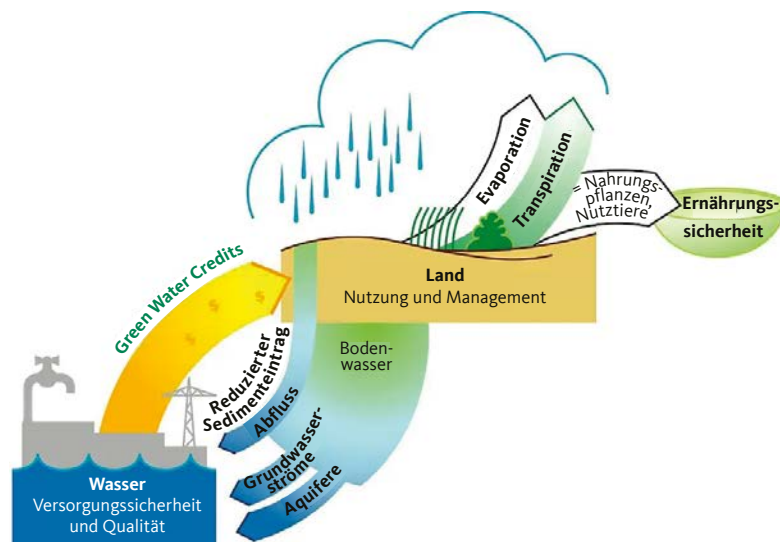


Abbildung 6.3-3

Grundidee von Green Water Credits. Landwirt:innen, die Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte und Erosionsreduktion ergreifen, dadurch auch den Wasserhaushalt stabilisieren und Sedimenteinträge verringern, werden durch andere profitierende Wassernutzer, z. B. Wasser- und Energieversorger, zusätzlich vergütet.

Quelle: ISRIC, 2024

flankierend existenzsichernde Angebote für den Übergang etabliert werden, die die Risiken der Transformation für die Landwirt:innen mindern. Unterstützung könnte z. B. durch eine an entsprechende Konditionen gebundene, zeitlich begrenzte Einkommensunterstützung für Landwirt:innen in Transformationsphasen oder eine teilweise Absicherung möglicher Mindererträge bei der Erprobung neuer Anbaumethoden erfolgen.

Forschung zum Potenzial von Anpassungsmaßnahmen: Schließlich sollte das Potenzial von Anpassungsmaßnahmen für die Reduktion von Klimarisiken bei fortschreitendem Klimawandel besser erforscht werden. Hier hebt der IPCC erhebliche Lücken hervor (Caretta et al., 2022).

.....

6.4 Lösungsraum Städte

Bis zum Jahr 2050 wird die globale Stadtbevölkerung auf schätzungsweise 6,6 Mrd. Menschen anwachsen, zwei Drittel der Menschheit werden dann in Städten leben (UN, 2019). Zugleich sind die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Städten weltweit immer deutlicher zu spüren. Neben steigendem Nutzungsdruck führen häufigere und längere Dürreperioden zu zunehmender Wasserknappheit und weltweit steigt die Zahl der Städte, in denen bereits ein Wassernotstand ausgerufen werden musste (Kap. 4.2). Häufigere und stärkere Extremniederschläge verursachen, verstärkt durch urbane Flächenversiegelung und überforderte Entwässerungssysteme, immer mehr Flutschäden. Zunehmender Hitzestress, der durch den urbanen Hitzeinseleffekt noch verstärkt wird, führt zu einer steigenden Zahl hitzebedingter Todesfälle (Kap. 4.2). Dabei variiert die Vulnerabilität der urbanen Bevölkerung erheblich, sowohl zwischen verschiedenen Städten als auch innerhalb einzelner Städte und Stadtquartiere (WBGU, 2016).

Angesichts der in vielen Regionen zunehmenden wasserbezogenen Verschärfungen (Kap. 3) bedarf es in Städten auf der ganzen Welt dringend einer Beschleunigung der Anpassung an den Klimawandel. Hierzu gehören insbesondere der entsprechende Ausbau wasserbezogener Infrastruktur sowie die Etablierung adäquater Managementstrategien. Derzeit tragen jedoch in vielen Städten unzureichende Wasserinfrastrukturen und Missmanagement im Wassersektor zur urbanen Vulnerabilität gegenüber Klimarisiken bei. Sie verursachen zudem lokale und regionale Gesundheits- und Umweltprobleme, insbesondere durch Wasserverschmutzung in Folge nicht dauerhaft funktionierender Wasserbereitstellung und unzureichender Abwassersysteme (GCEW, 2023a). Für eine nachhaltige und gerechte Stadtgestaltung der Zukunft ist die umfassende und zügige Etablierung eines klimaresilienten urbanen Wassermanagements daher von

zentraler Bedeutung.

6.4.1 Wassersensible Stadtentwicklung als Leitbild etablieren

Klimaresilientes Wassermanagement in Städten geht über inkrementelle Anpassung hinaus und bedeutet, die gesamte städtische Infrastruktur von Grund auf so zu gestalten, dass sie den Auswirkungen von Extremereignissen resilienter begegnen kann und den lokalen Wasserkreislauf befördert und nicht behindert. So können die zunehmenden Wasserextreme effizienter abgepuffert werden. Als Leitbilder hierfür haben sich in den letzten Jahren die Konzepte der „wassersensiblen Stadtentwicklung“ bzw. „Schwammstadt“ etabliert (Wong et al., 2020; Rogers et al., 2020; Han et al., 2023; LAWA, 2021). Der WBGU unterstützt das Leitbild einer wassersensiblen Stadtentwicklung, die durch einen weitestgehend naturnahen Wasserkreislauf geprägt ist, der auch zu einem gesunden Stadtklima beiträgt und Ökosystemleistungen stärkt. Insoweit befürwortet der WBGU mit Nachdruck die aktuellen Bestrebungen in Deutschland, das Leitbild der wassersensiblen Stadtentwicklung in einen neuen § 1b des Baugesetzbuchs aufzunehmen (BMWSB, 2024: 9).

Damit eine wassersensible Stadtentwicklung gelingt ist es nötig, die Funktionen von Wasser für urbane Ökosysteme sicherzustellen, also ihren Wasserbedarf in hinreichender Wasserqualität zu decken. Zu einem klimaresilienten urbanen Wassermanagement gehört auch, den Zugang zu sauberem Trinkwasser und Sanitärinfrastruktur für die gesamte Stadtbevölkerung heute und in Zukunft zu gewährleisten – auch bei sich schneller verändernden Randbedingungen. Ein langfristiges Ziel klimaresilienten Wassermanagements ist, dass sich urbane Wasserkreisläufe in den natürlichen Landschaftswasserhaushalt des gesamten Wassereinzugsgebiets einfügen. Das bedeutet zum einen, dass der Niederschlag in einer Stadt den natürlich vorherrschenden Bedingungen gemäß vollständig lokal verdunsten und versickern kann. Zum anderen führen Abwassereingleitungen aus Siedlungen nicht zu einer Belastung mit persistenten Schadstoffen in aufnehmenden Gewässern.

Die durch den WBGU vorgeschlagenen Handlungsprinzipien eines klimaresilienten Wassermanagements (Kap. 5.2, 6.1.1) sollten auch in Städten Anwendung finden. Hierzu gehört unter anderem, existierende Pfadabhängigkeiten zu überwinden, zukünftige zu vermeiden sowie Klimaprojektionen unter verschiedenen Szenarien zu berücksichtigen und dafür Vorbereitungen zu treffen. Zur Umsetzung eines klimaresilienten urbanen Wassermanagements kann auf einen umfangreichen

6 Klimaresilientes Wassermanagement

Werkzeugkasten an bewährten Maßnahmen zurückgegriffen werden, die auf technischen und naturbasierten Elementen sowie deren Kombination basieren (Tab. 6.4-1). Eine scharfe Trennung zwischen grauer und blau-grüner

Infrastruktur ist dabei weder notwendig noch zielführend: Verschiedene Maßnahmen können in hybriden Ansätzen kombiniert werden, um den kontextspezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden

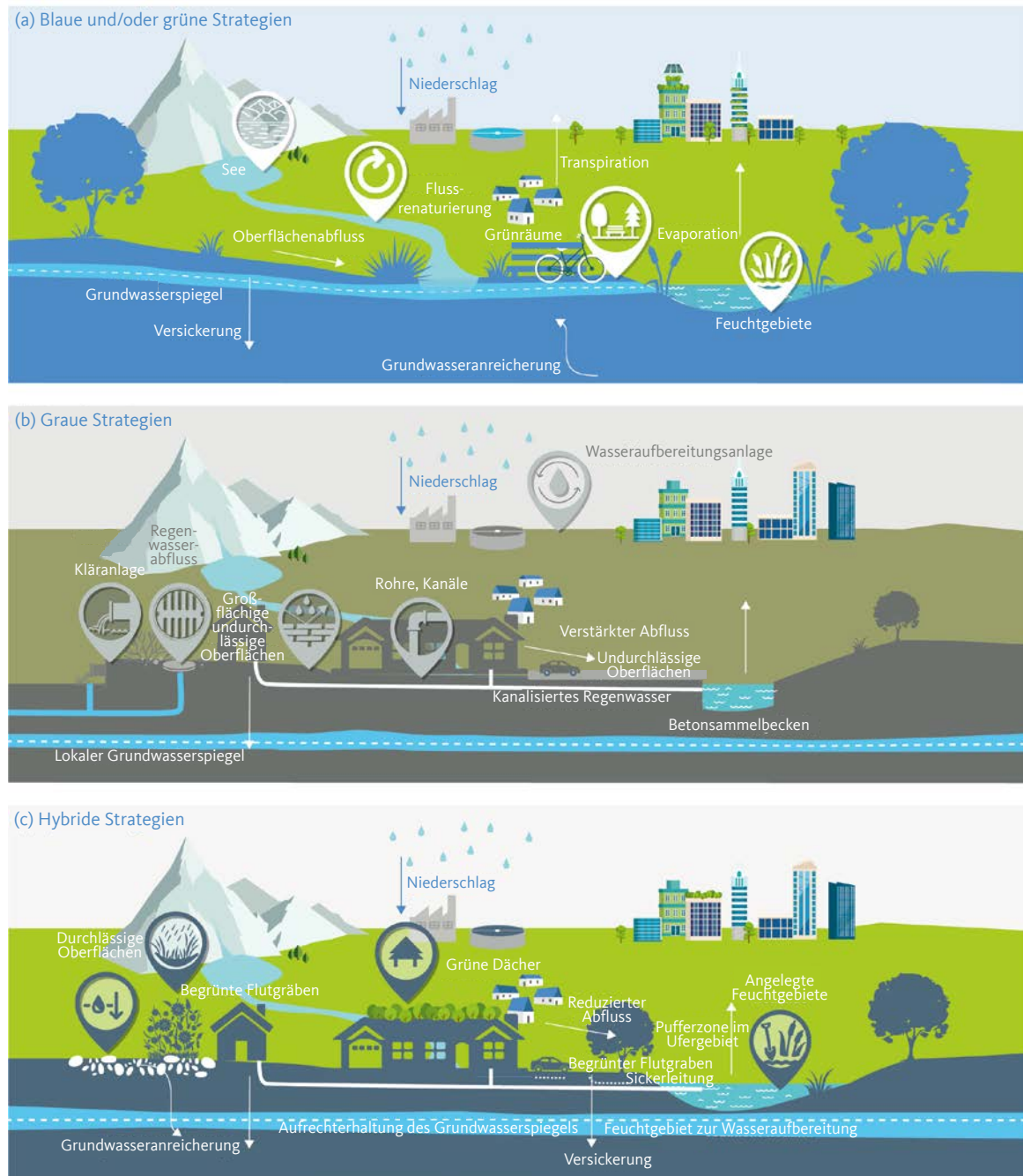


Abbildung 6.4-1

Strategien zur Anpassung urbaner Wasserinfrastruktur an den Klimawandel. Zur Umsetzung eines klimaresilienten urbanen Wassermanagements steht ein umfangreicher Werkzeugkasten an Maßnahmen zur Verfügung, wobei zwischen grauer und blau-grüner Infrastruktur unterschieden wird. Im Rahmen hybrider Strategien werden verschiedene Maßnahmen kombiniert, um den lokalen Anforderungen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Quelle: IPCC, 2022b, basierend auf Depietri und McPhearson, 2017

(Abb. 6.4-1; Depietri und McPhearson, 2017; IPCC, 2022b). Der WBGU empfiehlt, auch in Städten bei der Realisierung eines klimaresilienten Wassermanagements die vier Anforderungen für die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen im Kontext der wasserbezogenen Verschärfungen zu beachten (Kasten 6.1-1). Die Wirksamkeit und Machbarkeit von Maßnahmen werden dabei auch maßgeblich durch die technischen Möglichkeiten zur Umsetzung im Bestand oder Neubau sowie den zur Verfügung stehenden Ressourcen beeinflusst (Kap. 6.1.2).

6.4.2

Klimaresilientes Wassermanagement im Kontext urbaner Transformationen

Städte spielen eine zentrale Rolle bei der Transformation zur Nachhaltigkeit. Neben der Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen und einer effektiven Klimaanpassung ist die Gewährleistung urbaner Lebensqualität (z. B. Zugang zu erschwinglichem, klimaangepasstem Wohnraum sowie die Ermöglichung von Teilhabe und urbaner Eigenart) essenziell, denn sie ist eine wichtige Ressource urbaner Transformationen (WBGU, 2016). Dies sollte auch bei einem klimaresilienten urbanen Wassermanagement stets berücksichtigt werden.

Da Menschen in sozial benachteiligten Stadtquartieren oft deutlich vulnerabler gegenüber Klimarisiken sind, ist der Abbau sozialer Ungleichheiten auch ein Beitrag zu einer verbesserten Klimaresilienz. Die Herausforderungen für nachhaltige Transformationen sind je nach Stadttyp sehr unterschiedlich (WBGU, 2016). Diese spiegeln sich auch in den unterschiedlichen kontextspezifischen Anforderungen an ein klimaresilientes urbanes Wassermanagement wider.

In Ländern hohen Einkommens kommt es vor allem auf einen nachhaltigen und klimaresilienten Umbau bereits bestehender Infrastruktur an, inklusive des Gebäudebestands (WBGU, 2016). Maßnahmen mit höherem Flächenbedarf sowie invasiven Eingriffen (z. B. Neubau von Ver- und Entsorgungsleitungen) sind in bestehenden Stadtquartieren teils nur eingeschränkt oder mit hohem Aufwand zu realisieren.

Für Länder niedrigen und mittleren Einkommens bietet die fortschreitende Urbanisierung ein Gelegenheitsfenster, denn hier muss ein großer Teil der städtischen Infrastruktur in den kommenden Jahrzehnten erst noch errichtet oder weiter ausgebaut werden (WBGU, 2016). Unzureichende Ressourcen und Defizite urbaner Governance führen jedoch vielfach zur Entstehung informeller Quartiere und Slums. Diese sind deutlich schlechter vor Klimarisiken geschützt, denn neben einer unzureichenden baulich-räumlichen Struktur (z. B. enge Wohnverhältnisse,

unzureichender Schutz gegen Hitze) verfügen sie oft nicht über hinreichende Trinkwasser- und Sanitärinfrastruktur (Kap. 7.3). Die zügige Verbesserung dieser grundlegenden Probleme mit begrenzten Ressourcen ist daher ein wichtiges Ziel. Ein Beispiel für transformative Maßnahmen im Sinne eines klimaresilienten Wassermanagements in Ländern niedrigen Einkommens ist der Ausbau dezentraler und nicht leitungsgebundener Abwassersysteme, wie am Beispiel Lusaka (Sambia) erläutert (Kap. 7.3.2).

6.4.3

Der Ausbau blau-grüner Infrastruktur als urbane Mehrgewinnstrategie

Eine besondere Mehrgewinnstrategie in Städten ist der Ausbau blau-grüner Infrastruktur. Hierzu zählen etwa Regenrückhalteflächen mit Mehrzweckfunktion wie städtische Parks und Sportflächen, Feucht- und Waldgebiete, naturnahe Flutpolder, Vegetation im Straßenraum sowie Dach- und Fassadenbegrünung. Blau-grüne Infrastruktur kann zum einen Schutz vor urbanen Sturzfluten und Dürren bieten und spielt eine wichtige Rolle bei der wassersensiblen Stadtentwicklung. Zum anderen besitzt sie das Potenzial, durch die Bereitstellung verschiedener weiterer Ökosystemleistungen positive Effekte zu entfalten, die über ihre wasserbezogenen Funktionen hinausgehen (LAWA, 2021; WBGU, 2023).

Sie bieten so zahlreiche Möglichkeiten für ökologische, gesundheitliche und soziale Mehrgewinne: Urbane Grünräume bieten Lebensräume für verschiedene Arten und fördern Biodiversität und Klimaschutz (Whitmee et al., 2024). Sie spielen zudem eine zentrale Rolle für die physische und mentale Gesundheit der Stadtbevölkerung, denn sie ermöglichen Aufenthalt, körperliche Bewegung und soziale Aktivitäten mit Naturkontakt. Sie können so auch soziale Kohäsion verstärken, die sich ebenfalls positiv auf Gesundheit und Wohlbefinden auswirken kann (WBGU, 2016, 2023). Aktivitäten mit Naturkontakt können darüber hinaus allgemein nachhaltige und gesunde Lebensstile fördern (WBGU, 2023). Urbane Grünräume tragen außerdem zur Verbesserung der Luftqualität und Abschwächung des städtischen Wärmeinseleffekts bei, wodurch die Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Hitze verringert wird. Benachteiligte Bevölkerungsgruppen profitieren besonders von urbanen Grünräumen, wenn diese hinreichend erreichbar, zugänglich und auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten gestaltet sind. So können soziale und gesundheitliche Ungleichheiten verringert werden. Auch beim Ausbau blau-grüner Infrastruktur sollte darauf geachtet werden, Fehlanpassung und negative nicht intendierte Konsequenzen zu vermeiden, etwa die Auslösung allergischer Reaktionen oder negative soziale Effekte in Folge der

Tabelle 6.4-1

Beispiele für Maßnahmen, die für eine wassersensible Stadtentwicklung geeignet sind. Sie basieren auf technischen und naturbasierten Elementen. Gezeigt sind zudem beispielhaft zu beachtende Aspekte entsprechend der vier in Kapitel 6.1.2 vorgeschlagenen Anforderungen für die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen im Rahmen eines klimaresilienten Wassermanagements.

Maßnahmen	Ziel	Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen
Technische Rückhalteräume für Regenwasser (Rückhalte- und Überlaufbecken, Staukanäle)	Schutz vor urbanen Sturzfluten	Kurzfristig umsetzbar und wirksam; technische Klimaanpassung einfach
Retentionsbodenfilter für Regenwasserbehandlung	Höhere Wasserqualität	Kurzfristig umsetzbar und wirksam; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; technische Klimaanpassung einfach
Pflanzenkläranlagen	Höhere Wasserqualität	Kurzfristig umsetzbar und wirksam; technische Klimaanpassung einfach
Versickerungsrigolen	Schutz vor urbanen Sturzfluten und Dürren	Kurzfristig: schnellere Regenwasserversickerung; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; technische Klimaanpassung einfach
Wasserdurchlässige Flächenbeläge	Schutz vor urbanen Sturzfluten und Dürren	Kurzfristig: schnellere Regenwasserversickerung; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; technische Klimaanpassung einfach
Dach- und Fassadenbegrünung	Schutz vor urbanen Sturzfluten	Kurzfristig wirksame Regenwasseraufnahme und Abgabe durch Evapotranspiration; technische Klimaanpassung im Bestand schwierig
Entsiegelung und Begrünung von Straßenrändern, Mittelstreifen, Straßenbahngleisen	Schutz vor urbanen Sturzfluten und Dürren	Kurzfristig: schnellere Regenwasserversickerung; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; technische Klimaanpassung einfach
Städtische Parks und Begrünung öffentlicher Räume	Schutz vor urbanen Sturzfluten und Dürren	Kurzfristig: schnellere Regenwasserversickerung; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; Wirkungsverzögerungen möglich; Klimaänderungen können Vegetation und Wirksamkeit beeinträchtigen; technische Klimaanpassung einfach
Flutpolder	Schutz vor Flusshochwasser	Kurzfristig wirksam durch mehr Schwemmflächen; sich ändernde Abflussbedingungen können Wirksamkeit einschränken; technische Klimaanpassung einfach
(Wieder-)Vernässung bzw. Renaturierung von städt. Feuchtgebieten und Auwäldern (Kap. 6.2.2)	Schutz vor urbanen Sturzfluten, Dürren und Flusshochwasser	Kurzfristig: schnellere Regenwasserversickerung, mehr Schwemmflächen; Langfristig: bessere Grundwasserneubildung; Wirkungsverzögerungen möglich; technische Klimaanpassung schwierig

Durch die Umsetzung von Maßnahmen für eine wassersensible Stadtentwicklung können mögliche Mehrgewinne verstärkt genutzt und nicht intendierte Konsequenzen vermieden werden.

Quelle: WBGU

Machbarkeit im spezifischen Kontext	Mögliche Mehrgewinne (Beispiele)	Mögliche nicht intendierte Konsequenzen (Beispiele)
Flächenbedarf und finanzieller Aufwand hoch; Umsetzung im Bestand aufwändig und teuer; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Vermiedene Mischwasserentlastungen verbessern Gewässerqualität; Schaffung von Erholungsräumen	Brutstätten für Krankheiten übertragende Vektoren (Moskitos) in stehenden Gewässern
Flächenbedarf niedrig; Umsetzungskosten mittel; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Biodiversitätsschutz	Vernässung von Kellern, negative ökonomische und Gesundheitsfolgen
Flächenbedarf mittel; Umsetzung im Bestand aufwändig und mit mittleren Kosten; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig bis mittel	Biodiversitätsschutz; Gesundheitsschutz (Entfernung pathogener Mikroorganismen)	Brutstätten für Krankheiten übertragende Vektoren (Moskitos) in stehenden Gewässern
Flächenbedarf niedrig; Umsetzungskosten niedrig bis hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Verbesserung der Wasserqualität durch erhöhte Regenwasserversickerung; Biodiversitätsschutz	Schadstoffeintrag aus Verkehrsflächen in Boden und Grundwasser beeinträchtigt Umwelt und Gesundheit
Umsetzung im Bestand aufwändig und ressourcenintensiv; Umsetzungskosten mittel bis hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Positive Gesundheitseffekte durch verbessertes Mikroklima: Entsigelung reduziert städtischen Wärmeinseleffekt und Hitzestress	Schadstoffeintrag aus Verkehrsflächen in Boden und Grundwasser beeinträchtigt Umwelt und Gesundheit
Umsetzung im Bestand aufwändig und ressourcenintensiv; ggf. Bewässerungsbedarf; Umsetzungskosten mittel bis hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Biodiversitätsschutz; Dämmwirkung und Abpuffern von Temperaturschwankungen; besseres Mikroklima, weniger Hitzestress in Innen- und Außenräumen	Negative Gesundheitsfolgen, z. B. allergische Reaktionen, toxische Wirkung inhalierter Pilzsporen
Flächenbedarf niedrig; einfache und schnelle Ausführung; ggf. Bewässerung notwendig; Umsetzungskosten niedrig bis hoch, Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Biodiversitätsschutz; besseres Mikroklima und Verschattung; filtert Luftverschmutzung; Lärmschutz; Förderung gesundheitsförderlicher, nachhaltiger Mobilität	Negative Gesundheitsfolgen, z. B. allergische Reaktionen, ggf. kleinräumig erhöhte Luftverschmutzung; Sichteinschränkung
Flächenbedarf ggf. hoch; möglich: „pocket parks“, Begrünung ungenutzter Flächen; Umsetzung im Bestand aufwändig/eingeschränkt; ggf. Konflikte mit Wohn- und Mobilitätsflächen (Lösungsansatz: Leitbild dreifache Innenentwicklung; WBGU, 2023); ggf. schwierig zu deckender Bewässerungsbedarf; Umsetzungskosten mittel bis hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig bis mittel	Biodiversitätsschutz; besseres Mikroklima, Verschattung; filtert Luftverschmutzung; Lärmschutz; bessere Luftzirkulation in Umgebung; gesundheitsförderliche Erholungs- und Bewegungsräume und Mobilität; weniger soziale und gesundheitliche Ungleichheiten	Negative Gesundheitsfolgen, z. B. allergische Reaktionen; Verdrängung benachteiligter Bevölkerungsgruppen aus ökonomisch aufgewerteten Stadtteilen
Flächenbedarf hoch; Umsetzung im Bestand aufwändig/eingeschränkt; ggf. Flächennutzungskonflikte; Umsetzungskosten hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten niedrig	Biodiversitätsschutz; positive gesundheitliche, ökologische und soziale Effekte ähnlich wie bei Parks	Verlust von Brutgebieten bei Überflutung
Flächenbedarf hoch; Umsetzung im Bestand aufwändig/eingeschränkt; ggf. Flächennutzungskonflikte; langfristig durch Klimawandel ggf. höherer Wasserbedarf; Umsetzungskosten hoch; Erhaltungs- und Anpassungskosten mittel bis hoch	Biodiversitätsschutz; gesundheitsförderliche Erholungs- und Bewegungsräume; positive gesundheitliche, ökologische und soziale Effekte ähnlich wie bei Parks	Austrocknung von Teilen des Feuchtgebiets kann Funktion stark beeinträchtigen

Verdrängung benachteiligter Bevölkerungsgruppen durch Aufwertung von Stadtquartieren.

Eine besondere Herausforderung für den Ausbau blau-grüner Infrastruktur sind mögliche Zielkonflikte der Flächennutzung in bestehenden Stadtquartieren. Für ihre Bewältigung kann eine Orientierung am Leitbild der „dreifachen Innenentwicklung“ hilfreich sein

(an die jeweiligen regionalen Bedingungen angepasste Balance zwischen baulicher Verdichtung, Mobilität und der Schaffung von Grün- und Blauräumen; WBGU, 2023). Mögliche Lösungsansätze sind beispielsweise die Einrichtung vieler kleinerer „pocket parks“ und die Begrünung vormals ungenutzter öffentlicher, versiegelter Flächen (WBGU, 2023). Zudem müssen künftige wasserbezogene

Kasten 6.4-1

Praxisbeispiel: Blau-grüne Infrastruktur in Städten – der „Wolkenbruchplan“ in Kopenhagen

Im Jahr 2011 erlebte Kopenhagen (Dänemark) extrem starke Niederschläge mit bis zu 100 mm pro Stunde, die Schäden von bis zu 800 Mio. € verursachten (The City of Copenhagen, 2012: 5; Arnbjerg-Nielsen et al., 2015). Dieses Ereignis verdeutlichte die Unzulänglichkeit der bestehenden Infrastruktur für den Umgang mit Extremereignissen, die künftig zunehmen werden: Infolge des Klimawandels ist Dänemark im Vergleich zu anderen Ländern vor allem durch ein „zu viel“ an Wasser betroffen; starke Niederschläge wie im Juli 2011 könnten in Zukunft deutlich häufiger auftreten (Arnbjerg-Nielsen et al., 2015).

Die Stadtverwaltung entschied daher, die städtische Infrastruktur mit dem „Wolkenbruchplan“ (dänisch: Skybrudsplan, englisch: Cloudburst Management Plan; The City of Copenhagen, 2012) konsequent auf naturbasierte Maßnahmen zur langfristigen Klimawandelanpassung auszurichten. Ziel der Infrastrukturmaßnahmen ist, bei Starkregenereignissen den Wasseranstieg auf Straßen und Plätzen auf maximal 10 cm zu begrenzen, ausgenommen auf ausgewiesenen Überflutungsflächen (The City of Copenhagen, 2012: 12). Die Auswertung der Verteilung der Wassermassen bei den Überflutungen von 2011 führte zu der Erkenntnis, dass die Stadt künftig als zusammenhängendes Wassersystem bewirtschaftet werden muss. Dafür ist eine Kombination aus oberirdischen Flächen zum dezentralen Rückhalt und zur Versickerung, kontrollierter oberirdischer Ableitung in speziell angepassten Straßen sowie unterirdischen Leitungen geplant (The City of Copenhagen, 2015: 28 f.). Der naturorientierte Um- und Ausbau der oberirdischen Infrastruktur durch Entsiegelung, die Schaffung von mehr Stadtgrün und künstlichen Gewässern in Parks, auf Straßen und Plätzen spielt dabei eine zentrale Rolle. Die Ausgaben für die Umsetzung des Wolkenbruchplans verteilen sich auf die Gemeinde Kopenhagen und den Betreiber der Wasserinfrastruktur HOFOR. Um die Gesamtausgaben des Projekts zu finanzieren, wurden die Abwassergebühren erhöht; für einen vierköpfigen Haushalt stiegen die mittleren jährlichen Ausgaben dadurch um 1.375 DKK (etwa 185 €; The City of Copenhagen, 2015: 42).

In der Planungsphase wurde der Wolkenbruchplan mit einer konventionellen Lösung verglichen, deren Fokus die Erweiterung der unterirdischen Infrastruktur, insbesondere der Kanalisation und technischer Rückhaltebecken, gewesen wäre (The City of Copenhagen, 2015: 36). Bei einer sozioökonomischen Beurteilung, welche die Bau- und Betriebskosten beider Lösungen sowie die vermiedenen Schadenskosten berücksichtigte, zeigte sich, dass die Gesamtkosten des Wolkenbruchplans niedriger als die der konventionellen Infrastrukturlösung sind. Sie liegen zudem deutlich unter den zu erwartenden Schadens-

kosten des Business-as-usual-Szenarios, in dem keine Anpassungsmaßnahmen stattfinden. Dabei wurde ein Zeithorizont von 100 Jahren veranschlagt (The City of Copenhagen, 2015: 36 f.). Bei der Analyse wurden auch Mehrgewinne in verschiedenen Bereichen berücksichtigt, z. B. gesundheitliche Vorteile und die ökonomische Aufwertung von Immobilien durch den Ausbau von Grünräumen (Atelier Dreiseitl GmbH und Rambøll Group, 2013). Darüber hinaus hat eine unabhängige Lebenszyklusanalyse der beiden Lösungen für den Stadtteil Nørrebro ergeben, dass die negativen unbeabsichtigten Umweltfolgen (u. a. Beitrag zu Klimawandel, Sommersmog, Eutrophierung von Süßgewässern) des Wolkenbruchplans substanziell niedriger sind als die der konventionellen Infrastrukturlösung (Brudler et al., 2016).

Die über 300 Einzelprojekte, die gemeinsam den Wolkenbruchplan bilden, werden Schritt für Schritt bis in die 2030er Jahre umgesetzt (The City of Copenhagen, 2015: 8). Daher ist eine abschließende Bewertung des Projekts noch nicht möglich. Einige bereits fertig gestellte Teilprojekte wie die umgestalteten Grünanlagen „Skt. Kjelds Plads“ und „Tåsinge Plads“ sowie die Grünstraße „Bryggervangen“ werden jedoch bereits auf Fachkonferenzen als Leuchtturmbeispiele diskutiert (Negrello, 2022; The City of Copenhagen, 2016; Xu et al., 2021a). Dabei werden insbesondere die erfolgreiche Integration von Regenwassermanagement, Biodiversitätsschutz, Gesundheit und Lebensqualität sowie die Einbindung von Bürger:innen und Zivilgruppen während des Planungsprozesses hervorgehoben (Negrello, 2022; Xu et al., 2021a). Es findet zugleich eine kritische sozialwissenschaftliche Auseinandersetzung mit Teilprojekten des Wolkenbruchplans statt, etwa dem „Hans Tavsens Park“ im Stadtteil Nørrebro und möglichen negativen Folgen seiner Umgestaltung für benachteiligte Bevölkerungsgruppen (Tubridy, 2020). Bei einer Auswertung möglicher Mehrgewinne blau-grüner Infrastruktur sollte unbedingt erörtert werden, welche Bevölkerungsgruppen weniger profitieren oder sogar benachteiligt werden (etwa durch Verdrängungseffekte), und wie solche negativen Konsequenzen verhindert werden können (Anguelovski et al., 2019).

Der Ausbau blau-grüner Infrastruktur im Rahmen des Wolkenbruchplans illustriert eine transformative Stadtgestaltung im Sinne eines klimaresilienten Wassermanagements. Die in Kopenhagen umgesetzte Umgestaltung des öffentlichen Raums zur langfristigen Krisenprävention deutet darauf hin, dass ein Paradigmenwechsel strukturelle Veränderungen bei der Stadtentwicklung in Gang setzen kann. Insbesondere die umfangreiche Überprüfung der technischen und finanziellen Machbarkeit sowie die Einbeziehung der Bevölkerung können für andere Städte in Ländern mit hohem Einkommen als Beispiel dienen. Die Übertragbarkeit auf Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen, mit geringerer Verfügbarkeit finanzieller und technischer Ressourcen, ist jedoch eingeschränkt.





Abbildung 6.4-2

Der „Wolkenbruchplan“ in Kopenhagen als Beispiel für blau-grüne Infrastruktur in Städten. Links: Bei Starkregenereignissen wird Kopenhagen, hier der Stadtteil Nørrebro, als zusammenhängendes Wassersystem bewirtschaftet. Wasser wird oberirdisch zurückgehalten und kontrolliert in speziell angepassten Straßen abgeleitet. Rechts: Der Kreisverkehr Skt. Kjelds Plads wurde durch Entsiegelung und Bepflanzung zu blau-grüner Infrastruktur umgestaltet, die lokalen Rückhalt und die Versickerung von Regenwasser ermöglicht.

Quellen: Brudler et al., 2016 (links); Negrello, 2022 (rechts)

Verschärfungen berücksichtigt werden (Kap. 3): Abhängig von den örtlichen klimatischen Bedingungen und Änderungen in Folge des Klimawandels kann heute bzw. in Zukunft eine künstliche Bewässerung von Grünräumen notwendig werden.

Die Umsetzung des Skybrudsplans in Kopenhagen (Dänemark) und die Nutzung einer alternativen Bewässerungsressource für städtisches Grün in Schweinfurt (Deutschland) sind Beispiele für die Umsetzung klimaresilienten Wassermanagements in Hoheinkommensländern, bei denen blau-grüne Infrastruktur eine zentrale Rolle spielt (Kasten 6.4-1; 6.4-2). Der Ausbau dezentraler und nicht leitungsgebundener Abwassersysteme, die für Länder niedrigen und mittleren Einkommens eine große Bedeutung haben, wird am Beispiel Lusaka (Sambia) im Kap. 7.3.2 erläutert.

6.5

Handlungsempfehlungen

6.5.1

Übergreifende Handlungsempfehlungen

Neue Herangehensweise im Wassermanagement etablieren: Mit Unsicherheit leben

Es sollte flächendeckend ein klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement etabliert werden, das lokale, regionale und globale Wasserkreisläufe vorausschauend bewirtschaftet und dadurch die verschiedenen Funktionen des Wassers für Menschen und Ökosysteme langfristig erhält. Um ein Handeln und Entscheiden unter Unsicherheit zu ermöglichen, sind transdisziplinäre und kollaborative Lern- und Entscheidungsprozesse über verschiedene Sektoren und räumliche Skalen hinweg nötig. Grundlage sind empirische Daten, Echtzeitinformationen und Zukunftsprojektionen unter verschiedenen Klimaszenarien zu Wasserdargeboten und -bedarfen,

wobei auch ein zunehmender Wasserbedarf im Zuge der Energiewende berücksichtigt werden muss. Eine Digitalisierungsoffensive im Wassersektor auf lokaler und nationaler Ebene ist zur Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung von Echtzeitdaten dringend erforderlich und bietet die Grundlage für eine gut informierte Entscheidungsfindung. Die gewählten Wasserbewirtschaftungsmethoden müssen auf dieser Grundlage konstant überwacht, ausgewertet und gegebenenfalls kurzfristig angepasst werden. Dafür müssen Strukturen und Prozesse für Planung und Entscheidung im Wassermanagement akteursübergreifend, anpassungsfähig und korrigierbar sowie Infrastrukturmaßnahmen dezentraler und adaptiver gestaltet werden.

Wassermanagement auf die Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts ausrichten

Um die zunehmenden Extremereignisse effizient abpuffern zu können, ist es langfristig erforderlich, einen klimaresilienten Landschaftswasserhaushalt flächendeckend wiederherzustellen und ihn dort, wo er noch intakt ist, zu schützen und zu stärken. Da entsprechende Maßnahmen teilweise erst zeitverzögert wirken, ist es erforderlich, sie mit kurzfristig wirksamen Maßnahmen zu kombinieren, ohne unerwünschte Pfadabhängigkeiten zu erzeugen. In Anlehnung an den vom WBGU vorgeschlagenen integrierten Landschaftsansatz (WBGU, 2020) sollte ein integrierter Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz

Kasten 6.4-2

Praxisbeispiel: Nutzung alternativer Wasserressourcen für die Bewässerung des städtischen Grüns in Schweinfurt

Die Auswirkungen des Klimawandels, z. B. länger anhaltende Trockenperioden, veränderte Niederschlagsverteilungen, eine Abnahme der Bodenfeuchte und sinkende Grundwasserspiegel, beeinflussen auch in Deutschland die Verfügbarkeit von Wasser in Städten (UBA, 2021b). Daher ist eine klimaresiliente urbane Wasserversorgung in ausreichender Menge und Qualität für die Sicherstellung der öffentlichen Trinkwasserversorgung sowie für die Deckung von Kühl- und Prozesswasserbedarfen in Gewerbe und Industrie dringend erforderlich. Zusätzlich ist der Wasserbedarf für die Bewässerung städtischer Grünflächen schon heute vielerorts gestiegen und wird in Zukunft noch weiter zunehmen (Kendzia, 2020).

Im Folgenden wird als Beispiel innovativer Klimaanpassung sowie einer wasserresilienten und zugleich ressourcenschonenden Stadtentwicklung die Nutzung alternativer Wasserressourcen für die Bewässerung städtischen Grüns in Schweinfurt (Unterfranken) dargestellt. Unterfranken ist eine Region, die mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von weniger als 500 mm in trockenen Jahren einen sehr angespannten Wasserhaushalt hat. Eine Wasserwiederverwendung durch die Aufbereitung und Nutzung kommunaler Kläranlagenabläufe kann hier dazu beitragen, den steigenden Wasserbedarf des Stadtgrüns zu decken, ohne die knappen Wasserressourcen weiter zu beanspruchen. Das Stadtgrün spielt seinerseits eine wichtige Rolle in der Klimaanpassung – sowohl zur Stabilisierung des Wasserhaushalts als auch für den Schutz von Gesundheit und Biodiversität.

Neben der Etablierung dezentraler Regenwasserrückhaltemaßnahmen im Zuge des geplanten Ausbaus blau-grüner Infrastruktur soll der Bewässerungsbedarf für städtisches Grün, der bisher durch Trinkwasser und lokales Grundwasser gedeckt wurde, durch eine alternative Wasserressource ersetzt werden. Dafür wird die Stadt Schweinfurt das kommunale Abwasser der Stadt so aufbereiten, dass eine sichere Wasserwiederverwendung möglich wird. Das Abwasser der Stadt wird derzeit in einer zentralen Kläranlage mit einer Ausbaupkapazität von 250.000 EW (9,7 Mio. m³ pro Jahr) behandelt und in den Main eingeleitet. Im Vorgriff auf die neuen Anforderungen der

EU-Kommunalabwasserrichtlinie wird die Kläranlage bis 2027 mit einer vierten Reinigungsstufe, bestehend aus Ozonung und biologischer Aktivkohlefiltration, ausgestattet. Damit ergibt sich eine deutliche Frachtreduktion organischer Spurenstoffe für den Main als aufnehmendes Gewässer. Ein Teilstrom des so behandelten Abwassers soll darüber hinaus mit einer UV-Anlage desinfiziert werden, um es für verschiedene Zwecke wiederzuverwenden, insbesondere die Bewässerung (Drewes, 2024).

Die Aufbereitung, die Qualität sowie verschiedene Anwendungen des so gewonnenen Nutzwassers wurden in einem durch das BMBF geförderten Vorhaben im Rahmen der Fördermaßnahme WavE (Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung) umfangreich untersucht. Die erzielte Wasserqualität erfüllt sowohl die mikrobiologischen als auch die chemischen Anforderungen der EU-Verordnung zur Wasserwiederverwendung deutlich. Das Wasser kann damit zur Bewässerung auf Sport- und Freizeitflächen, Parks und Grünstreifen, als alternative Wasserressource für eine zukünftige Quartiersentwicklung, für die Gemüsebewässerung in der landwirtschaftlichen Produktion sowie für sonstige gewerbliche Zwecke sicher eingesetzt werden (Ho et al., 2024). Der Bewässerungsbedarf von Stadtgrün wird in Schweinfurt über Echtzeitdaten der Wetterverhältnisse und Bodenfeuchte erfasst, so dass bedarfsgerecht bewässert wird. Die Stadt Schweinfurt ist damit die erste Stadt in Deutschland, die recyceltes Nutzwasser für urbane Anwendungen flächendeckend einsetzt.

Eine Herausforderung bei der Wiederverwendung kommunaler Abwässer besteht darin, dass häufig eine räumliche Trennung zwischen dem Ort des Anfalls (Kläranlage) und der Verwendung (städtischer Bereich) dieser alternativen Wasserressource besteht. Daher wird eine eigene Verteilungs- und Speicherinfrastruktur benötigt, die durch grundsätzlichen Umbau bestehender Strukturen oft nur mit hohen Kosten und großem baulichem Aufwand zu realisieren wäre. In Schweinfurt wurde daher für das recycelte Nutzwasser ein neues eigenes Netz von ca. 3,5 km Länge von der Kläranlage zurück in die Stadt geplant, wobei gleichzeitig minimalinvasiv auf bestehende Strukturen zurückgegriffen wurde. So wurde eine DN 110-Druckrohrleitung in den bestehenden Hauptsammler der Stadt eingezogen, womit der bauliche Aufwand deutlich reduziert und gleichzeitig eine beschleunigte Bauausführung ermöglicht wurde (Abb. 6.4-3; Drewes, 2024).

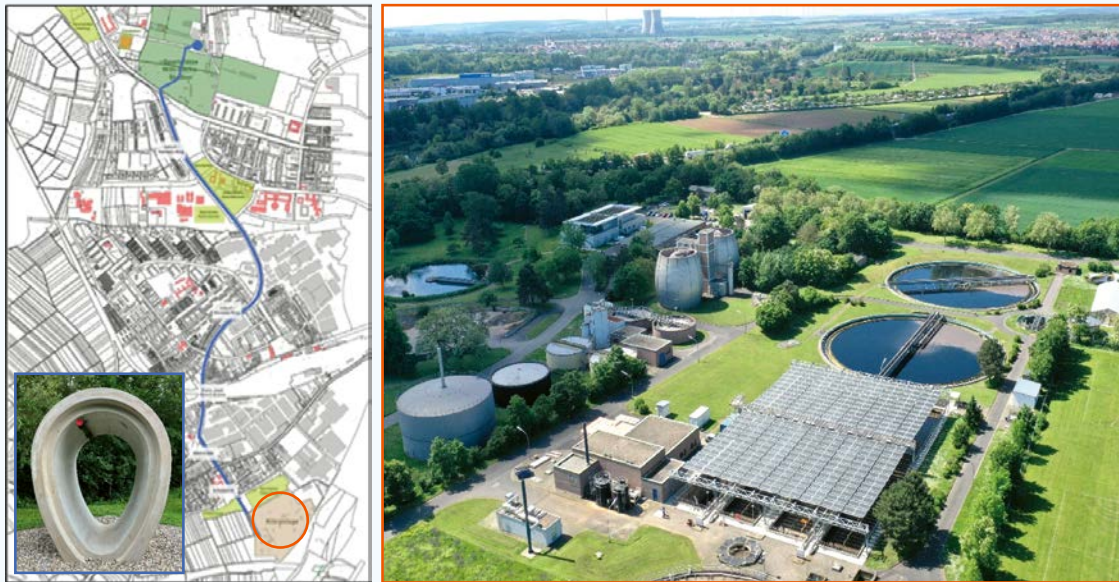


Abbildung 6.4-3

Verteilung des recycelten Nutzwassers in Schweinfurt (Unterfranken). Von der Kläranlage (rechtes Foto sowie unten auf der Karte) wird das aufbereitete Abwasser durch eine DN 110-Druckrohrleitung (linkes Foto) in die Stadt geleitet, die minimal-invasiv in den bestehenden Hauptsammler der Stadt eingezogen wurde.

Quelle: Stadtentwässerung Schweinfurt (Karte und rechtes Foto); Drewes, TU München (linkes Foto)

verfolgt werden, der den Schutz von Klima und Biodiversität, den Flächenbedarf zur Ernährungssicherung und die Stärkung natürlicher Puffer im Wasserhaushalt auf Flächen aller Nutzungsarten zusammendenkt. Da das in Böden und Pflanzen gespeicherte grüne Wasser für diese Pufferfunktionen eine wichtige Rolle spielt, ist es dringend erforderlich, es im Wassermanagement künftig stärker zu berücksichtigen und dabei auch die durch den Klimawandel veränderten Niederschlags- und Verdunstungsdynamiken einzubeziehen.

Klimaanpassung, Wassermanagement und Ökosystemschutz stärker verzahnen

Intakte Ökosysteme sind Grundvoraussetzung, um regulierende Ökosystemleistungen zur Stabilisierung des Wasserdargebots stärker nutzen zu können. Daher sollte die Sicherstellung der Funktionen von Wasser für Ökosysteme künftig eine zentrale Rolle im Wassermanagement spielen. Hierfür kann es hilfreich sein, Ansätze der ökosystembasierten Anpassung (Ecosystem-based Adaptation, EbA) ins Wassermanagement zu integrieren, z. B. durch eine Verzahnung mit dem IWRM-Ansatz. Synergien können sich auch aus einer stärkeren und besser koordinierten Verzahnung der derzeit parallel existierenden Praxisfelder Wassermanagement (hier insbesondere der Umsetzung des IWRM-Ansatzes) und Klimaanpassung ergeben, sodass zur Verfügung stehende Ressourcen

effizienter eingesetzt und bereits etablierte multisektorale Strukturen genutzt werden können. Eine Orientierung an bestehenden Praxisbeispielen kann hierbei hilfreich sein (Jimenez und Bray, 2022; UNEP, 2022; de Ruyter van Steveninck et al., 2018). Der Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus-Ansatz (Kap. 2.4.1.3) sollte stärker genutzt werden, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Wasser, Energie, Ernährungssystemen und Ökosystemen sowie hydrologische, biologische, soziale und technologische Einflussfaktoren im lokalen Wassermanagement zu berücksichtigen. Auf Grundlage transdisziplinärer Forschung (Kap. 6.6.1) sollten insbesondere in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens verstärkt multisektorale Projekte an der Schnittstelle von Wassermanagement, Gesundheitssystemen sowie Ökosystemschutz und -renaturierung gefördert und ihre Finanzierung erleichtert werden.

Wasserportfolios diversifizieren, Mehrfachnutzungen etablieren und Flexibilität in der Nachfrage erhöhen

Um die lokale Trinkwasserversorgung auch bei einem langfristig schwankenden Wasserdargebot sowie zunehmenden Extremereignissen wie Dürren und Überflutungen resilienter zu machen, ist die Nutzung verschiedener unabhängiger blauer Wasserressourcen erforderlich, die redundant sind und sich gegenseitig ergänzen. Wo lokal

erforderlich und technisch möglich, sollten auch alternative Wasserressourcen wie entsalztes Meerwasser oder die Wiederverwendung kommunaler Kläranlagenabläufe stärker genutzt werden. Nachteilige nicht intendierte Konsequenzen, etwa für Ökosysteme und menschliche Gesundheit, müssen dabei unbedingt vermieden werden. Mehrfachnutzungen von Wasser verschiedener Qualitätsstufen sollten, wo machbar, technisch ermöglicht und dafür bereits beim Bau von Wasserinfrastruktur und Gebäuden antizipiert werden. Um eine flexiblere und vorsorgende Bewirtschaftung von Wasserressourcen zu ermöglichen, sollten flächendeckend digitale Wasserinformationssysteme etabliert werden, die die dynamischen Entnahmen von Privathaushalten, öffentlichen Einrichtungen und der Industrie erfassen, damit die Bereitstellung durch den Versorger insbesondere bei schwankendem Dargebot angepasst werden kann. Beim Echtzeitmonitoring des Wasserverbrauchs in Haushalten und Gewerbe sollte künftig auch künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen, hierzu besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Unter Berücksichtigung der für verschiedene Zwecke erforderlichen Wasserqualität können insbesondere bei Großverbrauchern dezentrale Wasserspeicher und Wasserwiederverwendung etabliert werden, die zu einer flexibleren Wasserentnahme beitragen.

Wirksamkeit und Machbarkeit, Mehrgewinne und nicht intendierte Konsequenzen von Maßnahmen unter sich verschärfenden Bedingungen bewerten

Um kurzfristig mit zunehmenden Extremereignissen umzugehen, sollte – in Kombination mit langfristig wirksamen Maßnahmen zur Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts – ein breites Spektrum adaptiver, schnell wirksamer und ressourceneffizienter Maßnahmen zum Einsatz kommen, von rein technischen bis hin zu stärker naturbasierten Maßnahmen. Die Entwicklung, Auswahl und Kombination sowie die Etablierung und ggf. der Betrieb kurz- und langfristig wirksamer Maßnahmen sollte flexibel je nach räumlich und zeitlich spezifischen Erfordernissen und Rahmenbedingungen erfolgen und sich an vier Anforderungen orientieren: (1) die Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen, im Hinblick auf spezifische wasserbezogene Ziele sowie in jedem Fall bezüglich ihres Beitrags für die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts, jeweils unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und Wirkungsverzögerungen; (2) die Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext, unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Technologien, finanziellen Mitteln, institutionellen Kapazitäten, ihrer Akzeptanz sowie ihres Flächen- und Ressourcenbedarfs – auch im Hinblick auf langfristigen Betrieb und möglicherweise im Zeitverlauf nötige Anpassung; (3) die stärkere Berücksichtigung

möglicher Mehrgewinne für Klima- und Biodiversitätsschutz sowie Gesundheit, sozialer und wirtschaftlicher Vorteile sowie von Effekten auf die Verringerung von Ungleichheiten; und (4) die Vermeidung von Fehlanpassung und nicht intendierten wasserbezogenen, ökologischen, gesundheitlichen, sozialen und wirtschaftlichen Konsequenzen, durch Anwendung eines systemischen und transdisziplinären Ansatzes. Maßnahmen sollten grundsätzlich so geplant und ausgeführt werden, dass eine technische Anpassung an Folgen des Klimawandels während der Nutzungsdauer mit dem kleinstmöglichen Aufwand durchführbar ist. Die bisher verwendeten Planungsgrundlagen für Infrastrukturmaßnahmen, wie das Auftreten eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ_{100}), müssen ebenfalls angepasst werden, auf Grundlage entsprechender Forschung (Kap. 6.6.1).

Ansätze für Abwägungsprozesse unter Unsicherheit weiterentwickeln und anwenden

Zuständige staatliche Stellen sollten bei Planungs- und Zulassungsentscheidungen künftig die vier Anforderungen für die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen im Kontext wasserbezogener Verschärfungen berücksichtigen (Kap. 6.1.2). Ansätze zur Abwägung zwischen verschiedenen Maßnahmen unter Unsicherheit sollten konsequent genutzt, gegebenenfalls weiterentwickelt und ihre Anwendung gefördert und angeregt werden. Dies erfordert den Aufbau von Kapazitäten und Expertise, insbesondere zur Unterstützung lokaler Entscheidungsträger:innen, und die Entwicklung standardisierter, aber zugleich hinreichend flexibler Verfahren. Hierfür ist auch die Schaffung rechtssicherer Planungsgrundlagen wichtig, die eine hinreichende Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken ermöglichen, ohne die kurzfristige Umsetzung von Maßnahmen zu behindern. Die Umsetzbarkeit komplexer Folgenabschätzungen, multikriterieller Analysen und von Abwägungsprozessen unter Unsicherheit sollte auch bei eingeschränkten finanziellen, institutionellen und personellen Ressourcen erleichtert werden, z. B. in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens bzw. auf kommunaler Ebene in Hoheinkommensländern. Zu diesem Zweck sollten vereinfachte Varianten der entsprechenden Instrumente entwickelt werden, die den jeweiligen Anforderungen dennoch bestmöglich gerecht werden.

Fehlanpassung und nicht intendierte Konsequenzen durch transdisziplinäre Lern- und Entscheidungsprozesse verhindern

Bei der Zulassung und Planung von Maßnahmen sowie begleitend zu ihrer Etablierung und ggf. ihrem langfristigen Betrieb sollten ergebnisoffene Diskussionen über mögliche Folgewirkungen unter Einbezug aller beteiligten und betroffenen Akteur:innen und Bevölkerungsgruppen

sowie der Wissenschaft stattfinden, um mögliche nachteilige Effekte von Maßnahmen zu identifizieren und frühzeitig gegensteuern zu können. Dabei sollten Zugangsbarrieren für marginalisierte Akteur:innen konsequent vermieden werden, etwa durch finanzielle Kompensation und Bereitstellung diskriminierungsfreier Räume. Die Effekte von Maßnahmen sollten zudem kontinuierlich mittels kontextspezifischer Indikatoren evaluiert werden. Für deren Entwicklung ist eine kritische Auseinandersetzung mit den komplexen Ursachen von Vulnerabilität sowie die Berücksichtigung sozialer Konsequenzen von Maßnahmen in Modellierung und Entscheidungsfindung im Sinne eines sozial-hydrologischen Ansatzes wichtig.

Systematische Folgenabschätzung von Maßnahmen harmonisieren

Eine harmonisierte Folgenabschätzung von Maßnahmen, die sich auf Projektionen und Szenarienrechnungen, Bewertungs- und Überwachungsinstrumente aus verschiedenen Disziplinen sowie Kartierungs- oder Visualisierungsplattformen stützt, könnte ein adaptives Wassermanagement prozedural und inhaltlich unterstützen. Die Beurteilung der Wirksamkeit, der Machbarkeit, der Mehrgewinne und nicht intendierter Konsequenzen von Maßnahmen könnte durch unabhängige wissenschaftliche Expert:innen erfolgen. Dies sollte im Diskurs mit allen beteiligten und betroffenen Akteur:innen geschehen, um transdisziplinäre Lern- und Entscheidungsprozesse zu ermöglichen. Die Ergebnisse könnten im Anschluss in relevanten gesellschaftlichen und politischen Foren diskutiert werden. Bei Expertisen sollte stets auf Interdisziplinarität der Wissenschaftler:innen geachtet werden. Indem auch sozialwissenschaftliche Disziplinen einbezogen werden, können die Wahrnehmung der Maßnahmen durch die Bevölkerung sowie beteiligte Institutionen und Implementierungslücken analysiert werden. Auch wenn durch einen solchen komplexen Prozess der Folgenabschätzung die Umsetzung der Maßnahmen verzögert wird, ist er angesichts der Komplexität der zu bewältigenden Herausforderungen dringend erforderlich und sollte vor Beginn und begleitend zur Maßnahmenumsetzung durchgeführt werden. Es bedarf zusätzlicher Ressourcen, um systematische Folgenabschätzungen stärker in wasserbezogene Entscheidungsprozesse zu integrieren. Ländern niedrigen und mittleren Einkommens fehlen oft die finanziellen Mittel, um solche Mechanismen zu entwickeln und umzusetzen, hier bedarf es bilateraler und internationaler Unterstützung. Im Rahmen der UNECE-Konvention existiert bereits ein „International Water Assessment Centre“, das auch die Implementierung von Projekten unterstützt. Dieses könnte durch eine Koordinierungsstelle zur Folgenabschätzung ergänzt werden. Als intermediärer Akteur, der die methodische Abstimmung vorantreibt, könnte das International Water Management

Institute (IWMI) fungieren. Für die Vermittlung regionaler Wasserexpert:innen, die Analysen konkreter Maßnahmen durchführen, könnten Austauschplattformen geschaffen werden, die bei der International Water Association (IWA) angesiedelt sind.

Gelegenheitsfenster zur Beschleunigung transformativer Anpassung nutzen

Transformative Anpassung ist im Wassersektor dringend erforderlich, auch schon bevor Krisen eintreten. Nachdem in Reallaboren unkonventionelle und innovative Maßnahmen ausgelotet und Umsetzungshindernisse durch transdisziplinäre Forschung identifiziert wurden, sollten erfolgreiche Praxisbeispiele und Praktiken zügig institutionalisiert und verbreitet werden. Das Forschungsprogramm Wasser: N betont bereits die Notwendigkeit von Erfolgsbeispielen für Synergieeffekte durch eine gleichzeitige Berücksichtigung mehrfacher Vorteile innovativer Wasserprojekte, auch um ihre Akzeptanz zu erhöhen (BMBF, 2021a: 36). Die Nutzung von Gelegenheitsfenstern wie dem Wiederaufbau nach Extremereignissen oder großräumigen Infrastrukturmaßnahmen in Städten kann transformative Anpassung beschleunigen. Wasserbezogene Maßnahmen sollten wenn möglich genutzt werden, um gleichzeitig den Klima- und Biodiversitätsschutz voranzubringen und um die Rahmenbedingungen für gesunde und nachhaltige Lebensstile zu verbessern, etwa in den Lebensbereichen Ernähren, Bewegen und Wohnen (WBGU, 2023: 83 ff.). Das ist beispielsweise möglich, wenn die Maßnahmen ohnehin mit einer baulichen Umgestaltung in Städten einhergehen. Wenn die Bedürfnisse benachteiligter Gruppen beachtet werden, können so auch soziale und gesundheitliche Ungleichheiten verringert werden.

Grenzüberschreitende transdisziplinäre Foren in besonders gefährdeten Gebieten schaffen

Es sollten transdisziplinäre Foren in besonders durch Wassernotlagen gefährdeten Gebieten geschaffen werden, um die anstehenden Herausforderungen zu thematisieren und gemeinsam mit Stakeholdern Anpassungsoptionen zu entwickeln (Kap. 6.6.1). Im Rahmen des „Transboundary Water Managements“ haben sich bereits Strukturen etabliert, die als Grundlage für solche Austauschprozesse dienen können. Es ist wichtig, derartige Prozesse zu verschiedenen betroffenen Gebieten zu initiieren und zu stärken. In solchen Foren könnten außerdem ein allgemeiner wissenschaftsbasierter Diskurs über Strategieentwicklung und Handlungsoptionen bei Unsicherheiten stattfinden.

6.5.2

Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Ökosysteme

Im Rahmen der UN-Dekade für die Wiederherstellung von Ökosystemen wurden zehn Prinzipien zur Unterstützung globaler Anstrengungen zur Renaturierung von Ökosystemen ausgearbeitet (FAO, 2021). Diese sind eher allgemeinerer Art, dabei aber von zentraler Bedeutung für eine systemische, synergistische und solidarische Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen in einem multifunktionalen Landschaftsmosaik (WBGU, 2024).

Die Renaturierung wasserbezogener Ökosysteme auf allen politischen Ebenen vorantreiben

Die Renaturierung wasserbezogener Ökosysteme sollte besondere Beachtung in relevanten Politikprozessen auf UN-, EU- und nationaler Ebene finden. Dies umfasst auch explizit wasserbezogene Aktivitäten innerhalb der UN-Dekade für die Wiederherstellung von Ökosystemen, der UN-Wasserdekade, der Agenda 2030 für Nachhaltigkeit, der Ramsar-Konvention, der EU-Wasserrahmenrichtlinie, der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur sowie der relevanten nationalen Strategien, z. B. zu Nachhaltigkeit, Wasser und Moorschutz. Nationale Projekte, wie z. B. das Bundesprogramm „Blaues Band Deutschland“ zur Renaturierung von Flüssen und Auen sollten weiter vorangetrieben werden, damit langfristig gewährleistet werden kann, dass die Ziele nachhaltig erreicht werden.

Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz langfristig fördern und Maßnahmen entschieden umsetzen

Die im Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) der Bundesregierung beschriebenen Handlungsfelder zeigen vielfältige Optionen auf, zu einer Renaturierung von Ökosystemen beizutragen. Die Maßnahmenübersicht stellt unter anderem dar, wie in verschiedenen Ökosystemtypen zielgerichtet auf einen klimaresilienten Wasserhaushalt hingearbeitet werden kann. Die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts sollte auch die Renaturierung von Auenwäldern und -wiesen sowie gegebenenfalls von Galeriewäldern mit ihren ökologischen Funktionen und Ökosystemleistungen einschließen, z. B. für eine gesteigerte Rückhalte- und Speicherfunktion für Wasser in der Landschaft oder siedlungsfreie Überflutungsräume. Auch zu wasserbezogener Forschung und einem möglichen internationalen Beitrag Deutschlands bietet das ANK Orientierung. Ein Beispiel für die im ANK genannten Maßnahmen ist die Umsetzung des Moorschutzes im Rahmen der nationalen Moorschutzstrategie. Diese stellt sehr umfassend Maßnahmen zum Erhalt, zur Wiederherstellung und zur nachhaltigen Nutzung von Mooren

vor. Der WBGU empfiehlt, das ANK und verwandte relevante Strategien aufgrund großer Mehrwerte langfristig zu fördern und enthaltene Maßnahmen auch im Interesse eines klimaresilienten Wassermanagements zeitnah umzusetzen.

Einen frühzeitigen Dialog mit Landnutzer:innen, Anrainern zu renaturierender Flächen und weiteren Stakeholdern initiieren

Im Sinne eines integrierten Landschaftsansatzes (WBGU, 2020) ist im Planungsprozess von Renaturierungsmaßnahmen ein frühzeitiger Dialog mit allen Landnutzer:innen, Anrainern der zu renaturierenden Flächen und weiteren Stakeholdern empfehlenswert. Dadurch können Konflikte vermieden, Mehrgewinne gesteigert und die Akzeptanz der Renaturierung erhöht werden. Eine inter- und transdisziplinäre Begleitung der Maßnahmen durch Expert:innen aus Ökologie, Hydrologie, Landwirtschaft und Soziologie kann zusätzlich wertvoll sein. Die Umsetzung der Maßnahmen sollte großräumig den Mosaikansatz in der Raumplanung berücksichtigen (WBGU, 2024).

Renaturierungsmaßnahmen mit Blick auf die Multifunktionalität des gesamten Flusssystems planen

Bei Anwendung des Mosaikansatzes (WBGU, 2024) entstehen vielfältige Fluss- und Auenlandschaften mit hoher Biodiversität, die diverse Funktionen erfüllen, z. B. Stabilisierung der Wasserpegel, Wasseraufbereitung, Grundwasserbildung und -regenerierung, CO₂-Bindung, Bereitstellung von Lebensräumen oder Erholung. So kann entlang des gesamten Flusssystems eine nachhaltige Nutzung u. a. für Schifffahrt, Fischerei, Tourismus und Trinkwasserversorgung ermöglicht sowie ein naturnahes, harmonisches Erscheinungsbild wiederhergestellt werden.

Die Entfernung von Barrieren in Flussläufen vorantreiben

Um die Konnektivität von Flussläufen wiederherzustellen und weitreichende ökologischen und wasserbezogenen Mehrgewinne zu ermöglichen, sollten Barrieren in Flussläufen wo sinnvoll und möglich entfernt werden. Dabei spielt nicht nur der Rückbau größerer Strukturen (> 10 m, z. B. Staudämme) eine Rolle, sondern auch die Entfernung kleinerer Barrieren (< 2 m) kann bedeutsam sein. Sie ist oft weniger kostspielig und findet gegebenenfalls schneller Zustimmung in der Gesellschaft (Belletti et al., 2020). Der Rückbau bzw. die Entfernung von Barrieren in Flüssen ist gerade mit Blick auf das Ziel der Biodiversitätsstrategie der EU, bis 2030 25.000 km freifließende Flüsse wiederherzustellen (im Vergleich zu 2020), von großer Bedeutung. Auf dieses Ziel wird auch in der EU-Verordnung über die Wiederherstellung der Natur Bezug genommen.

Die Möglichkeit der Entstehung neuer Ökosysteme bei Renaturierungsmaßnahmen und Raumplanung einbeziehen

Es kann vorkommen, dass die Struktur und Funktion eines Ökosystems nach einer Renaturierungsmaßnahme nicht dem Ausgangszustand entspricht und dabei sogar neue Ökosysteme (novel ecosystems) entstehen. Solche Entwicklungen sollten in Überlegungen zu Renaturierungsmaßnahmen und Raumplanung grundsätzlich mit einbezogen werden. Die zu erwartende und teilweise schon beobachtete Dynamik in der Entstehung neuer Ökosysteme sollte zu einer Reflexion des gesetzlich geregelten „guten ökologischen Zustandes“ (z. B. in der EU-Wasserrahmenrichtlinie) führen. Unter Umständen kann dies sogar eine Ergänzung unter Berücksichtigung von Renaturierung zur Steigerung der Resilienz von Ökosystemen bedeuten. Außerdem sollte die Bandbreite unterschiedlicher Entwicklungsmöglichkeiten nach Renaturierungsmaßnahmen an Stakeholder und die Öffentlichkeit kommuniziert und verschiedene Erwartungen an den Zielzustand vorab gemeinsam diskutiert werden (Bellmore et al., 2019).

Adaptives Management für Renaturierungsprojekte nutzen

Adaptives Management, das regelmäßiges Monitoring und robuste Modellierungen mit einbezieht, kann helfen, die Prozesse der Renaturierung eines Ökosystems zu antizipieren und bei Bedarf rechtzeitig Folgemaßnahmen zu ergreifen. Der Erfolg von Renaturierungsmaßnahmen, z. B. hinsichtlich eines nachhaltigen Zugewinns an Biodiversität und Ökosystemleistungen als Indikator für den Gesundheitszustand betroffener Wasserkörper, sollte durch Monitoring mit wissenschaftlich erprobten Methoden nachvollzogen werden.

6.5.3

Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Landwirtschaft

Datenerhebung zu Entnahmemengen, Dargebotsprojektionen und Digitalisierungsoffensive für die Landwirtschaft

Zum einen sollte die (Echtzeit-)Erhebung von Entnahmemengen und von Daten zum Status von Grundwasserkörpern verbessert werden. Zum anderen sollten Projektionen und (Echtzeit-)Daten zu Dargebot, potenziellen Bedarfen und tatsächlichen Entnahmen und Verbräuchen verbessert bzw. erhoben und zur Verfügung gestellt werden, für die Nutzungsoptimierung einzelner Landwirt:innen sowie als transparente Grundlage für übergreifende Planung und Regulierung. Beides sollte Teil einer breiteren Digitalisierungsoffensive für die Landwirtschaft sein und z. B. in

Deutschland in bestehende Digitalisierungsprogramme des Bundes und der Länder integriert werden (BMEL, 2022a, b). Für die Verbesserung öffentlich verfügbarer, lokaler Projektionen und die wissenschaftliche Begleitung von Anpassungsmaßnahmen müssen entsprechende Kapazitäten für die Landwirtschaft und andere Sektoren aufgebaut werden, in Deutschland z. B. auf Ebene der Bundesländer (u. a. für die Bewertung wasserbezogener Risiken von Investitionen; Kap. 8.3.1, 8.5.3.1).

Wissen zu wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft vermitteln sowie Best-Practice-Netzwerke aufbauen

Landwirt:innen sollten in ihrer Aus- und Fortbildung durch Beratungsstellen, Schulungsangebote und Support-Teams Wissen und Fähigkeiten für ein klimaresilientes Wassermanagement vermittelt werden. Landwirt:innen sollten in die praxistaugliche Weiterentwicklung der wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen einbezogen werden. Außerdem sollte neben der Forschung zu Anpassungsmaßnahmen auch stärker auf Erfahrungsaustausch zwischen Regionen gesetzt und Wissen z. B. aus Ländern mittleren und niedrigen Einkommens genutzt werden, die mit relevanten Praktiken Erfahrung haben. In diesen Ländern selbst, etwa in den Ländern Subsahara-Afrikas, sollte das Potenzial lokaler Wissenssysteme in lokalen Anpassungs- und Transformationsstrategien der Landwirtschaft noch besser genutzt werden (Filho et al., 2023). Entsprechende Beratungsangebote und Vernetzungsaktivitäten könnten international z. B. durch die Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) und in Deutschland durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) weiter ausgebaut werden (BLE, 2024).

Land- und Wasserakteure in einem gemeinsamen Managementregime integrieren

Lokale „Blauwasserakteure“ wie Wasserversorger oder Wasserbehörden sollten mit „Grünwasserakteuren“ – also vor allem Landnutzer:innen – in einem gemeinsamen Wassermanagementregime zusammengebracht werden, das auf einem integrierten Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz beruht (WBGU, 2020; Kap. 6.5.1). So kann eine systemische Betrachtung blauen und grünen Wassers bei der kontextspezifischen Auswahl wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen und naturbasierter, landbezogener Klimaschutzmaßnahmen sichergestellt werden. Insbesondere auf lokaler Ebene fehlt eine solche Integration oft noch, auch in Deutschland (LAWA, 2022). Fallweise können hier auch selbstorganisierte Strukturen beitragen bzw. gefördert werden (Kap. 8.5.2). Lokale Governanceplattformen mit Beteiligung von Land- und Wassernutzer:innen können auch helfen, finanzielle Ausgleichsmechanismen oder externe Finanzierung für gemeinsame Projekte zu organisieren (Kap. 8.5.3).

Finanzielle Anreize setzen und Transformationsanstrengungen absichern

Basierend auf verbesserten Daten sollten Ausgleichsmechanismen für wasserwirksame Maßnahmen zwischen Landnutzer:innen und Wassernutzer:innen etabliert werden, etwa Wasserfonds (Kap. 8.3). Agrarsubventionen sollten wassersensibel reformiert werden. Sie können ggf. Anschub- bzw. Überbrückungsfinanzierung für langfristig wirkende Maßnahmen bereitstellen und dafür auch in die genannten Ausgleichsmechanismen eingebunden werden. Agrarsubventionen sollten außerdem an die Bereitstellung bzw. Sicherstellung öffentlicher Güter gebunden werden, wozu auch die Reduktion wasserbezogener Risiken des Klimawandels für die Allgemeinheit und Ökosysteme gehört. In der EU betrifft dies den nächsten Zyklus der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) ab 2028, die zu einer gemeinsamen Ökosystempolitik (GÖP) umgestaltet werden sollte (WBGU, 2020). Da bei Wasserrisiken die Kooperation zwischen Landwirt:innen und öffentlicher Hand unabdingbar ist, könnten durch eine solche Reformierung von Agrarsubventionen neue Verhandlungsspielräume entstehen. Zudem sollten Strukturen geschaffen werden, in denen Landwirt:innen nachhaltige und wasserfreundliche Methoden erproben können, während die Gesellschaft das Risiko von Ertragsminderungen teilweise übernimmt. Die Übernahme könnte z. B. über eine an entsprechende Konditionen gebundene, zeitlich begrenzte pauschale Einkommensunterstützung, über eine teilweise Absicherung bzw. Versicherung von Mindererträgen bei Anwendung neuer Methoden oder über Modellhöfe mit neuem Geschäftsmodell erfolgen. Durch die genannten Maßnahmen sollte schließlich auch eine mögliche Regulierung oder Bepreisung tatsächlicher Wasserentnahmen und -verbräuche auf Basis verbesserter Daten mit Blick auf die soziale Ausgewogenheit unterstützt werden. Bei Maßnahmen für effizienteren Wasserverbrauch sollten Rebound-Effekte antizipiert und ggf. durch Regulierung adressiert werden.

6.5.4 Handlungsempfehlungen zum Lösungsraum Städte

Klimaresilientes urbanes Wassermanagement flächendeckend etablieren

Städtische Infrastruktur sollte entsprechend des Leitbilds der wassersensiblen Stadtentwicklung von Grund auf so gestaltet werden, dass sie den urbanen Wasserkreislauf befördert und nicht behindert. Eine wassersensible Stadtentwicklung sollte langfristig auch darauf abzielen, dass sich urbane Wasserkreisläufe in den natürlichen Landschaftswasserhaushalt des gesamten

Wassereinzugsgebiets einfügen. Mittel- und langfristige Klimaprojektionen unter verschiedenen Szenarien im Wassermanagement zu berücksichtigen ist hierbei essenziell. Synergien zwischen wassersensibler Stadtentwicklung und der Verringerung des städtischen Wärmeineffekts sollten gezielt angestrebt und genutzt werden. Zudem sollten stets die Gewährleistung urbaner Lebensqualität und der Abbau sozialer Ungleichheiten als wesentliche Beiträge zu einer verbesserten urbanen Klimaresilienz mitgedacht werden. Großskalige wasserbezogene Maßnahmen können dabei auch Gelegenheitsfenster bieten, die Rahmenbedingungen für gesunde und nachhaltige Lebensstile zu verbessern, etwa durch entsprechende Umgestaltung des Straßenraums.

Auf- und Ausbau klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur zügig vorantreiben

Angeichts der vielerorts zunehmenden wasserbezogenen Verschärfungen ist es in Städten weltweit dringend nötig, die Anpassung an den Klimawandel zu beschleunigen. Hierzu gehören insbesondere die Etablierung eines klimaresilienten Wassermanagements und der Auf- und Ausbau wasserbezogener Infrastruktur, wobei verschiedene Maßnahmen in hybriden Ansätzen kombiniert werden können und die vier Anforderungen für die Entwicklung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen berücksichtigt werden sollten (Kasten 6.1-1). Der Auf- und Ausbau wasserbezogener Infrastruktur muss vor allem in schnell wachsenden Städten deutlich beschleunigt werden, um mit dem raschen, oftmals informellen Wachstum (vor allem in Afrika und Asien) Schritt zu halten. Informelle Stadtquartiere sollten besondere Berücksichtigung finden, wobei z. B. auf dezentrale und nicht leitungsgebundene Abwassersysteme zurückgegriffen werden kann. Bei deren Planung und Umsetzung sollte die lokale Bevölkerung einbezogen, über gesundheitliche Vorteile aufgeklärt und Kapazitäten vormals informeller Dienstleister gestärkt werden. Die Finanzierung des Auf- und Ausbaus klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sollte verstärkt in der bi- und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit vorangetrieben werden.

Negative Konsequenzen blau-grüner Infrastruktur verhindern und Verdrängungseffekten vorbeugen

Um Fehlanpassung und eine Verstärkung von Vulnerabilität und bestehenden Ungleichheiten zu verhindern, ist beim Auf- und Ausbau blau-grüner Infrastruktur in Städten darauf zu achten, negative soziale, gesundheitliche und ökologische Konsequenzen zu vermeiden. Etwa sollte die Vegetation für zu erwartende Klimaänderungen geeignet sein und ein geringes allergenes Potenzial aufweisen. Es sollten zudem adäquate Maßnahmen ergriffen werden, um die Verdrängung benachteiligter

Bevölkerungsgruppen durch ökonomische Aufwertung von Stadtteilen und Formalisierung informeller Räume zu verhindern. Um gesundheitliche und soziale Mehrgewinne blau-grüner Infrastruktur für benachteiligte Bevölkerungsgruppen zu ermöglichen, sollten urbane Grünräume hinreichend erreichbar, zugänglich und auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten gestaltet sein, was transdisziplinäre und kollaborative Planungsprozesse sowie eine transparente Finanzierung voraussetzt.

Berücksichtigung langfristiger Wasserrisiken bei allen urbanen Infrastrukturmaßnahmen

Dem öffentlichen Sektor kommt bei der Bereitstellung wasserkritischer und -sensibler urbaner Infrastruktur in Bereichen der Daseinsvorsorge wie der Trinkwasserversorgung oder dem Hochwasserschutz durch direkte oder indirekte Beteiligung eine zentrale Rolle zu. Die Bundesregierung sollte Anstrengungen unterstützen, wasserbezogene Risiken in bestehende Verfahren zur Bewertung von Investitionen und Projekten, u. a. bei Beschaffung oder Ausschreibungen, stärker zu berücksichtigen. So kann die Resilienz öffentlicher Infrastruktur erhöht und das Risikobewusstsein bei Privatpersonen, Unternehmen und Verwaltungen geschärft werden. Internationale Initiativen im Rahmen des UN-Entwicklungsprogramms und des Global Water Partnership zielen bereits darauf ab, wasserbezogene Risiken in nationale Klimawandelanpassungspläne, etwa durch Bereitstellung von Leitlinien für Regierungen stärker zu integrieren und können als Orientierung dienen (GWP, 2019; FAO, 2018). Im Rahmen der Initiative Climate-ADAPT fördert und bündelt die EU übergreifende Initiativen, um Städte, Unternehmen und Privatpersonen zu befähigen, Maßnahmen zum Aufbau einer resilienten Infrastruktur zu fördern und bestehende Bewertungsmaßstäbe an wasserbezogene Risiken anzupassen (EEA, 2024a). Diese Bemühungen sollten in Zukunft verstärkt vorangetrieben werden und können als Vorbild dienen. Im Forschungsprogramm Wasser: N wird zudem auf die wichtige Rolle der Forschung für den Hochwasserschutz hingewiesen (Kap. 6.6.1), etwa durch die Entwicklung verbesserter Planungsinstrumente, von Vorhersagemodellen sowie von Hilfestellungen für eine hochwasserangepasste Stadtplanung (BMBF, 2021a: 33).

Notfallpläne für urbanen Wassermangel entwickeln

Die Zahl der Städte, die aufgrund von Wassermangel den Notfall ausgerufen haben, steigt weltweit an. Barcelona, Montevideo, Kapstadt, Chennai und São Paulo sind Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit (Kap. 4.2). Der zunehmende Wassermangel in Städten und urbanen Agglomerationen ist mit einer großen Zahl Betroffener ein wachsendes globales Problem, das ungelöst ein erhebliches Destabilisierungspotenzial birgt. Dieses Problem verdient daher in der internationalen

Nachhaltigkeitspolitik verstärkt Aufmerksamkeit und erfordert vorausschauendes Handeln unter Berücksichtigung langfristiger Prognosen und Szenarien. Städte sollten Aktionspläne für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der städtischen Wasserversorgung entwickeln. Beispiele bietet eine Gruppe sechs afrikanischer Städte, die solche Ansätze bereits erproben (Addis Abeba, Dire Dawa, Kigali, Musanze, Johannesburg, Gqeberha; Kuzma et al., 2023). Die Entwicklung urbaner Aktions- bzw. Notfallpläne ist nicht nur eine Aufgabe für die betroffenen Kommunen; auch internationale Entwicklungsakteure sind hier gefordert, finanziell und programmatisch Unterstützung zu leisten (z. B. bi- und multilaterale Entwicklungszusammenarbeit, Weltbank, Asiatische Entwicklungsbank und Afrikanische Entwicklungsbank).

Wasserbedingte Grenzen des Städtewachstums im Blick haben

Der voranschreitende Klimawandel wird viele Städte mit existenziellen Herausforderungen im Zusammenhang mit Wasser konfrontieren, die heute noch vielfach kaum thematisiert werden. Insbesondere Städte, die mittel- und langfristig das Problem der Wasserknappheit allein mit Infrastrukturmaßnahmen nicht wirksam werden lösen können (z. B. Neu-Delhi, Lahore oder Lima), sollten nach Ausschöpfung aller Mittel rechtzeitig Optionen zur Begrenzung des Städtewachstums bzw. im Extremfall Optionen für einen geordneten Rückzug prüfen. Internationale Institutionen sollten betroffenen Kommunen in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens Unterstützung leisten. Die mittel- und langfristigen Grenzen urbaner Expansion und die „limits to growth in cities“ sollten auch verstärkt in der Forschung berücksichtigt werden.

6.6

Forschungsempfehlungen

6.6.1

Übergreifende Forschungsempfehlungen

Planungs- und Entscheidungsprozesse unter Unsicherheit

Durch systemische Forschung ist zu klären, wie bestehende Strukturen und Prozesse für Planung und Entscheidung verändert werden müssen, um Maßnahmen implementieren zu können, die den Verschärfungen im Wassersektor gerecht werden. Folgenden Fragen kommt eine besondere Bedeutung zu: Wie können die durch Planung und Entscheidung potenziell berührten Interessen ermittelt, berücksichtigt und abgewogen werden, wenn

zunehmend schwerer abzusehen ist, welche Interessen in welchem Maße berührt werden? Welche Akteure sind zu Planungsentscheidungen legitimiert, wenn Planung flexibler und schneller auf veränderte Umstände reagieren muss und die dabei getroffenen Planungsentscheidungen immer einschneidender für die Betroffenen werden? Welche Implikationen hat eine angemessene Berücksichtigung grünen Wassers für Planungs- und Entscheidungsprozesse? Welche Implikationen hat der sich fortlaufend verändernde klimatische Variabilitätsrahmen für Planungs- und Entscheidungsprozesse, insbesondere für die erforderliche Prognoseentscheidung des Planungsträgers? Wie sähen Planungs- und Entscheidungsansätze, die dauernde Planungsunsicherheit aufgreifen, idealtypisch aus?

Instrumente und Indikatoren zur Quantifizierung verschiedener Wasserbedarfe unter nicht stationären Bedingungen

Es sollten Instrumente und Indikatoren zur Quantifizierung der Wasserbedarfe für die Gewährleistung verschiedener Funktionen von Wasser für Menschen und Ökosysteme (und damit verbunden für die Erhaltung von Ökosystemleistungen) entwickelt werden. Sie sollten geeignet sein, auf Grundlage von aktuell erhobenen Daten, Daten aus der Vergangenheit, mittels qualifizierter Zukunftsprojektionen unter verschiedenen Szenarien sowie unter Zuhilfenahme künstlicher Intelligenz kurz-, mittel- und langfristigen Handlungsbedarf zur Wasserbereitstellung aufzuzeigen. Bereits bestehende Instrumente und Modelle müssen erweitert werden, um Unsicherheiten besser zu berücksichtigen. Ergänzend sollten (Proxy-) Indikatoren entwickelt werden, die beurteilen, ob die verschiedenen Funktionen von Wasser für Menschen und Ökosysteme lokal und regional gewährleistet werden. Für die genannten Indikatoren sind Messmethoden nötig, die möglichst flächendeckend und mit geringem technischem Aufwand umsetzbar sind sowie als Grundlage für Projektionen zukünftiger Entwicklungen dienen können. Denkbar ist etwa, Methoden der Geofernerkundung mit stationären Messstationen zu kombinieren, möglichst unter Nutzung bereits bestehender Infrastrukturen und kontinuierlich erhobener Daten. Im Kontext der Multifunktionalität von Wasser sollten bei der Entwicklung der Instrumente und Indikatoren auch Überschneidungen der Wasserbedarfe verschiedener Funktionen von Wasser, die mögliche Mehrfachnutzung von Wasserressourcen für verschiedene Funktionen sowie Anforderungen an die Wasserqualität berücksichtigt werden. Wirkungen großtechnischer Infrastrukturprojekte (z. B. große Dämme oder Aquädukte), Geoengineering (z. B. „cloud harvesting“) sowie großflächiger Bewässerungsvorhaben und Landnutzungsänderungen mit möglicherweise grenzüberschreitenden Auswirkungen auf Verdunstung und

Niederschlag sollten durch entsprechende Forschung abgeschätzt werden.

Kontextspezifische Indikatoren für die Beurteilung von Maßnahmen

Bestehende Indikatoren für die Beurteilung von Maßnahmen, die bei ihrer Entwicklung, Auswahl und Kombination sowie bei ihrer Etablierung und ggf. bei ihrem Betrieb eingesetzt werden können, sollten wissenschaftlich fundiert weiterentwickelt werden. Die Indikatoren sollten geeignet sein, um die Wirksamkeit und Machbarkeit von Maßnahmen, ihre Mehrgewinne und ihre nicht intendierten Konsequenzen unter sich dynamisch verändernden Bedingungen und auf verschiedenen Zeitskalen sowie unter Berücksichtigung von Unsicherheit zu bewerten (Kap. 6.1.2). Sie sollten zudem kontextspezifisch anpassbar sein, um lokalen Anforderungen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden. Zudem sollten systematische Instrumente entwickelt werden, die eine flexibel an lokale Anforderungen anpassbare Gewichtung verschiedener Indikatoren und Kriterien ermöglichen und in transdisziplinären und kollaborativen Entscheidungsprozessen eingesetzt werden können.

Ansätze und Instrumente zur kombinierten Umwelt- und Gesundheitsfolgenabschätzung

Um nicht intendierte Konsequenzen von Maßnahmen zu vermeiden, mögliche Mehrgewinne zu identifizieren und klimaresiliente Wasserhaushalte zu fördern, sind evidenzbasierte Instrumente zur kombinierten Gesundheits- und Umweltfolgenabschätzung von Maßnahmen notwendig. Diese Instrumente sollten u. a. auf ökotoxikologische, epidemiologische und erdsystemwissenschaftliche Erkenntnisse zurückgreifen, vorausschauend arbeiten und auch mögliche zukünftige Entwicklungen berücksichtigen. Zu diesem Zweck sollte die Datengrundlage gestärkt werden und konventionelle Methoden der Technikfolgenabschätzung sollten mit innovativen digitalen Methoden (z. B. künstliche Intelligenz) und mit Modellen aus Klimafolgenforschung und Erdsystemanalyse kombiniert werden. So kann die wissenschaftliche Grundlage für eine harmonisierte Folgenabschätzung von Maßnahmen verbessert werden (Kap. 6.5.1).

Evaluation von umgesetzten Maßnahmen, Ursachen von Vulnerabilität und Fehlanpassung sowie Möglichkeiten ihrer Vermeidung

Um Fehlanpassung zu vermeiden und agile Anpassung von Politik zu fördern, sollten zum einen mehr Forschungsvorhaben finanziert werden, die Auswirkungen von Politikmaßnahmen evaluieren. Zum anderen sollten (bereits umgesetzte) praktische Maßnahmen der wasserbezogenen Klimaanpassung, inklusive kurzfristiger technischer Anpassungsmaßnahmen, systematisch

hinsichtlich ihrer wasserbezogenen Wirksamkeit sowie ihrer Effekte auf Vulnerabilität evaluiert werden. Entsprechend qualifizierte Ansätze und Instrumente sollten durch Forschung bereitgestellt werden. Zudem sollte die Anpassung bisher verwendeter Planungsgrundlagen für Infrastrukturmaßnahmen, wie das Auftreten eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ_{100}), durch entsprechende Forschung informiert werden (Kap. 6.5.1). Die Erforschung von an den Klimawandel angepassten wasserbezogenen Infrastrukturen und Managementstrategien ist ein Ziel der BMBF-Zukunftsstrategie Forschung und Innovation (BMBF, 2023: 49). Ein Schwerpunkt sollte außerdem darauf liegen, durch transdisziplinäre Forschung und unter Anwendung eines intersektionalen Ansatzes die kontextspezifischen Ursachen von Fehlanpassung und Vulnerabilität zu ergründen und Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung bzw. Verringerung zu entwickeln. Dies erfordert auch verstärkt kritische sozialwissenschaftliche Forschung zur Rolle von Machtverhältnissen bei der (Re-)Produktion von Vulnerabilität sowie zum Einfluss des fachlichen und sozialen Hintergrunds von Wissenschaftler:innen auf Forschungsmethoden und -ergebnisse. Zudem sollten die sozialen Konsequenzen von Maßnahmen im Sinne eines sozial-hydrologischen Ansatzes systematisch in Modellierung und Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Das Forschungsprogramm Wasser: N bietet hierfür wertvolle Ansatzpunkte und betont, dass neben technischen Aspekten zunehmend auch sozialökologische, ethische und rechtliche Aspekte betrachtet werden müssen (BMBF, 2021a: 36).

Evaluation bestehender und Entwicklung neuer multisektoraler Projekte in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens

Bestehende multisektorale Projekte an der Schnittstelle von Wassermanagement, Gesundheitssystemen sowie Ökosystemschutz und -renaturierung, insbesondere in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens, sollten systematisch mittels qualitativer und quantitativer transdisziplinärer Forschung evaluiert werden. Hierbei sollten insbesondere Auswirkungen auf verschiedene, sich überschneidende Vulnerabilitätsfaktoren beurteilt werden. Für erfolgreiche Projekte sollten Möglichkeiten der langfristigen Finanzierung und Institutionalisierung sowie der kontextspezifisch angepassten Weiterverbreitung erforscht und umgesetzt werden. Auf die Notwendigkeit von Erfolgsbeispielen wird auch im Forschungsprogramm Wasser: N hingewiesen (BMBF, 2021a: 36). Für die Entwicklung und Umsetzung neuer multisektoraler Projekte sollten, je nach spezifischer Problemlage, etablierte transdisziplinäre bzw. multisektorale Ansätze wie Planetary Health, One Health und Population, Health, Environment (PHE) genutzt werden. Es sollte dringend

erforscht werden, wie bei der Entwicklung und Umsetzung solcher Projekte indigenes, lokales und traditionelles Wissen sinnvoll und auf Augenhöhe einbezogen werden kann, wie zwar zunehmend gefordert, aber bisher kaum umgesetzt wird. Da in vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens das lokale Wassermanagement eine deutliche sozialgruppen- und geschlechtsspezifische Differenzierung in Bezug auf die Nutzung von und Verantwortlichkeit für Wasserressourcen aufweist, die in den meisten Fällen zu einer erhöhten Vulnerabilität von Frauen und genderdiversen Personen beiträgt (Fröhlich et al., 2018), sollte bei multisektoralen Projekten stets ein auf Rechten basierender und gendertransformativer Ansatz verfolgt werden. Ein auf Rechten basierender Ansatz für die Governance von Ressourcen (rights-based approach) beruht auf den drei Prinzipien Partizipation, Rechenschaftspflicht (accountability) und Nichtdiskriminierung und hat sich aus dem interdisziplinären Diskurs der Menschenrechte, den Zielen der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung und der transnationalen Ressourcengovernance entwickelt (Tambe, 2022).

Regionale Anpassungsmöglichkeiten im Wassersektor flächendeckend ausloten

Die regional spezifischen Anpassungsmöglichkeiten einer Gesellschaft oder eines Ökosystems hängen von vielen Faktoren ab. Weltweit und insbesondere in stark durch Wassernotlagen gefährdeten Gebieten sollten mögliche Anpassungsmaßnahmen systematisch evaluiert und wo nötig neu entwickelt werden. Dabei sollten verschiedene Faktoren berücksichtigt werden: regional verfügbare Wassermenge und Wasserqualität, beobachtete und unter verschiedenen Szenarien projizierte Entwicklungen von Extremereignissen, vorherrschende Landnutzung und Nutzungsdruck, Auswirkungen von Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Verschmutzung (in der jeweiligen regionalen Ausprägung), wirtschaftliche Leistung, regional- und sozialgruppenspezifische Vulnerabilitäten und Coping-Kapazitäten, technologische Möglichkeiten und existierende (Wasser-)Infrastruktur, gesellschaftliches Bewusstsein und Anpassungsbereitschaft, Nutzungspriorisierung, politische Rahmenbedingungen sowie zur Verfügung stehende bzw. notwendige internationaler Unterstützung. Zudem sollten regional unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten der „Überforderung“ und Dysfunktionalität bestehender Wasserinfrastruktur ermittelt werden.

Maßnahmen zur Erhaltung, Stärkung und Schaffung von Speicherkapazitäten im Wasserkreislauf

Bei vielen wasserbezogenen Verschärfungen spielen wegfallende Reserven (z. B. von Basisabflüssen aus Gletschern und Permafrostböden sowie durch Grundwasserübernutzung), die zunehmende Variabilität von Niederschlägen sowie zunehmende Extremereignisse eine zentrale Rolle.

Es sollte erforscht werden, wie bestehende und neue Pufferkapazitäten – insbesondere Böden und Vegetation, Aquifere und Seen oder künstliche Speicher – erhalten, verbessert oder neu geschaffen werden können (z. B. durch angepasste landwirtschaftliche Praktiken, Grundwasseranreicherung), in welcher Größenordnung sie zu einer Entschärfung der Lage beitragen können (insbesondere wenn sie auf grünem Wasser beruhen), und wie mit ökologischen, klimatischen und sozialen Zielkonflikten umgegangen werden kann (z. B. bei Wiederaufforstung, Wiederherstellung von Auenlandschaften). Beispiele für technische Puffersysteme sind Wasserkraftreservoirs als Wasserspeicher in heißen und trockenen Monaten, aber auch künstliche Eisreservoirs, die lokale und mittelfristige Anpassungsstrategien darstellen könnten (z. B. Eisstupas; Hock et al., 2019; Maharjan et al., 2023). Weitere Forschung ist nötig, die zum einen bewertet, ob bisherige und angedachte Maßnahmen ausreichend bzw. angemessen sind, und zum anderen die Vor- und Nachteile solcher Maßnahmen abwägt. Das Zusammenspiel von blauem und grünem Wasser für die Gewährleistung von Pufferfunktionen erfordert ein besseres Verständnis und eine gemeinsame Bilanzierung und Quantifizierung von Wasserströmen, gerade angesichts sich verändernder Wasserverfügbarkeiten. Dies gilt regional und über Landesgrenzen hinweg, denn sowohl für regionale Wasserkreisläufe als auch für den globalen Wasserkreislauf ist ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen grünem und blauem Wasser für die Sicherstellung von verschiedenen Wasserbedarfen und Niederschlagsmengen nötig. Mögliche ausgleichende Ansätze zur Verbesserung von Puffer- und Speicherkapazitäten sollten entlang des gesamten Wasserkreislaufs auf der Einzugsgebietsebene geprüft und auf dieser Grundlage angepasste Maßnahmen entwickelt werden.

Maßnahmen zur Gewährleistung der Wasserversorgung bei abnehmender Grundwasserverfügbarkeit

Technische Maßnahmen des Wasserrecyclings in Kombination mit künstlicher Grundwasseranreicherung können dazu beitragen, den Prozess der natürlichen Grundwassererneuerung zu stützen und zu beschleunigen, Ökosysteme zu stabilisieren und Spitzenzeiten bei Angebot und Nachfrage zu überbrücken (d. h. Einspeisung von Überschüssen bei Starkregen und Bereitstellung bei Defiziten in Dürrezeiten). Dies kann z. B. durch das Anreichern von Aquiferen für die Bewässerungslandwirtschaft mit gereinigtem Abwasser oder mit Wasser aus Hochwässern (erfolgreiche Praxisbeispiele dazu u. a. in Marokko) sowie die Entwicklung und den Einsatz von Technologien zum Wassersparen und zur weitergehenden Abwasseraufbereitung gelingen. Landnutzungsänderungen über Fernerkundung, z. B. mittels Satelliten, zu überwachen,

könnte dazu beitragen, Quellen der Verschmutzung und Übernutzung zu ermitteln und die Erhebung verbrauchsabhängiger Wassergebühren zu unterstützen, um Anreize für eine effiziente Wassernutzung zu schaffen. Dies wurde z. B. als Teil wirtschaftlicher Lösungen im jordanischen Hochland und der Azraq-Oase bereits umgesetzt (Houdret und Heinz, 2022; World Bank, 2018). Zur kontextspezifischen Ausgestaltung solcher und ähnlicher Maßnahmen besteht dringender Forschungsbedarf.

Digitalisierung zur effizienteren Steuerung der Wasserverfügbarkeit und des Wasserbedarfs

Gerade in Regionen mit angespannten Wasserdargeboten ist es notwendig, die Bedarfe privater Haushalte sowie des Gewerbes und der Industrie zeitlich und räumlich besser zu erfassen, idealerweise in Echtzeit. Eine solche Digitalisierung ermöglicht eine flexiblere und vorsorgende Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Es besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Erfassungsdichte von Verbrauchsstellen, ethischer Aspekte der Datenerhebung, bezüglich Datenverarbeitung, Datensicherheit und Bereitstellung sowie Möglichkeiten des Einsatzes künstlicher Intelligenz. Angepasste digitale Lösungen sollten dabei die unterschiedlichen Randbedingungen in Ländern verschiedener Einkommensgruppen berücksichtigen.

6.6.2 Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Ökosysteme

Forschung zu hydrologischen Voraussetzungen der Renaturierung wasserbezogener Ökosysteme im Klimawandel ist essenziell, um die Wasserdynamiken des entsprechenden Ökosystems zu verstehen, zu prognostizieren und sicherzustellen, dass die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts erfolgreich ist, ohne umliegende Gebiete negativ zu beeinflussen. Dabei sollten insbesondere Potenziale berücksichtigt werden, durch „Revegetation“ (d. h. Wiederbegrünung) und „Rewilding“ (d. h. das Wiederzulassen natürlicher Prozesse) Mehrgewinne für eine Kostensenkung der getroffenen Maßnahmen und gleichzeitige Biodiversitätsförderung zu erreichen.

Wasserperspektive und wasserbezogene Ökosysteme in der nationalen Forschungsstrategie Zukunft und Innovation stärker berücksichtigen

Die Perspektive der Wasserversorgung sowie der Schutz und die Wiederherstellung wasserbezogener Ökosysteme, insbesondere von Süßwasserökosystemen, sollten in die Forschungsstrategie Zukunft und Innovation der Bundesregierung integriert bzw. stärker berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte die Mission „Klimaschutz,

Klimaanpassung, Ernährungssicherheit und Bewahrung der Biodiversität voranbringen“ neben den bereits erwähnten Mooren und Wäldern auch die Bedeutung von Sümpfen, Marschen und Auenlandschaften für ein klimaresilientes Wassermanagement einbeziehen.

Forschung zu Sumpf- und Flusslandschaften ausbauen

Um unterschiedlichen Nutzungsansprüchen an Flussläufe und -landschaften gerecht zu werden, braucht es verstärkt Forschung, die ihre vielfältigen Ökosystemleistungen analysiert, auch abhängig von verschiedenen Renaturierungsmaßnahmen. Einen Beitrag leistet hier z. B. das RESI-Projekt der BMBF-Fördermaßnahme ReWaM. Die gewonnen Erkenntnisse sollten in eine multifunktionale Raumplanung einfließen. Insbesondere die Bestandssicherung von aquatischen Ökosystemen im Klimawandel benötigt Kenntnisse zu Möglichkeiten der Sicherung der kontinuierlichen Verfügbarkeit qualitativ hochwertigen Wassers, auch bei möglicher Konkurrenz zur Deckung des Wasserbedarfs angrenzender Agrarräume.

Langzeitstudien zum Wassereintrag in Hochmoore fördern

Ein ausreichender Eintrag von Wasser, durch Niederschläge oder anderen Zufluss, ist Voraussetzung für die dauerhafte Revitalisierung von Mooren. Dies ist im Klimawandel möglicherweise nicht mehr gewährleistet. Daher sollte der Einsatz alternativer, nährstoffarmer Wasserressourcen für die Wiedervernässung von Mooren untersucht werden. Weiterhin stellt die weitere Typisierung und Kartierung von Mooren einen wichtigen Forschungsbedarf dar, um Moore und ihren Beitrag zum Klimaschutz sowie zum Erhalt spezifischer Biodiversität effektiv überwachen, erhalten, schützen und renaturieren zu können. Beispielsweise sind in den Tropen bisher nur etwa ein Drittel der Moore kartiert (Gumbrecht et al., 2017).

Langzeitstudien zur Entfernung von Barrieren, insbesondere größerer Staudämme, aus Flussläufen

Noch fehlen ausreichend Langzeitstudien zu den vielfältigen Auswirkungen einer Entfernung von Barrieren, insbesondere größerer Dämme, aus Flussläufen sowie zum Vergleich zwischen dem ökologischen Zustand vor dem Bau, nach dem Bau und nach Entfernung der Barrieren (Bellmore et al., 2019; Duda und Bellmore, 2022; Magilligan et al., 2021). Solche Forschungs- und Monitoringprojekte sollten initiiert bzw. langfristig gefördert werden. Dabei sollte auch darauf geachtet werden, dass die Projekte repräsentativ für unterschiedliche Umweltbedingungen sind.

Sozial-ökologische Forschung zur Renaturierung von Ökosystemen stärken

Die Leistungen wasserbezogener Ökosysteme sowie die Einflüsse von Management und Renaturierung sollten unter Berücksichtigung sozialer Einflussfaktoren und Auswirkungen umfassend untersucht werden. Zudem sollten Methoden zur wirksamen Umsetzung des integrierten Landschaftsansatzes für wasserbezogene Ökosysteme erforscht und bereitgestellt werden.

6.6.3

Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Landwirtschaft

Neue Leitbilder und Berufsbilder für die Landwirtschaft und praxisnahe Weiterentwicklung von Anpassungsmaßnahmen

Bei erfolgreicher Umsetzung der Klimaziele in der Landwirtschaft, einschließlich jener mit Wasserbezug, ist in den nächsten Jahren eine Transformation des Berufsbilds Landwirt:in zu erwarten. Dieses wird je nach Klima- bzw. Wasserbedingungen regional unterschiedlich ausgeprägt sein. Etwa ist in Ländern mit hoch industrialisierter Landwirtschaft das Berufsbild mit Agroforstwirtschaft noch im Detail zu entwickeln. Bei der gleichzeitigen Weiterentwicklung wasserbezogener Anpassungsstrategien und -maßnahmen sollte angesichts des schnell voranschreitenden Klimawandels mit diversen Ansätzen begonnen und praxisbegleitend geforscht werden: Lernen aus Erfahrung, direkte Umsetzung und stetige Weiterentwicklung jeweils regional passender Ansätze wird ganz im Vordergrund stehen. Nicht zuletzt gilt es auch nachzuvollziehen, wie landwirtschaftliche Produktivität sich bei nachhaltiger Bewirtschaftung für Klima und Wasser verändert und sichern lässt.

Verständnis der Machbarkeit, Effektivität und Kapazität wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft verbessern

Für ein besseres Verständnis der Machbarkeit, Effektivität und regionalspezifischer Potenziale wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen zur Minderung klimawandelbezogener Risiken heute und in Zukunft sollten Instrumente und Metriken zur Messung der Machbarkeit und Effektivität weiterentwickelt werden (Caretta et al., 2022). Anpassungsoptionen wie Verhaltensänderungen oder kapazitätsbildende Maßnahmen können in aktuellen Klima- und Wirkungsmodellen bisher oft nicht erfasst werden. Geeignete herunterskalierte Klima- und Wirkungsmodelle sind nötig, die ökonomische, soziale, kulturelle und Managementaspekte für ein großes Spektrum zukünftiger Anpassungsoptionen berücksichtigen.

In der Analyse von Anpassungsoptionen sollten auch Mehrgewinne für und Zielkonflikte mit nachhaltiger Entwicklung stärker einbezogen werden.

Potenziale und Grenzen von Bewässerung als Anpassungsoption besser abbilden

Insbesondere globale Modellierungen der Landwirtschaft, die mögliche Ertragssteigerungen durch Bewässerung aufzeigen, berücksichtigen die lokale Wasserverfügbarkeit häufig nicht hinreichend. Ihre Annahmen zu den Effekten einer Ausweitung der Bewässerung sind daher möglicherweise nicht realistisch (Caretta et al., 2022; Elliott et al., 2014). Wasserverfügbarkeit sollte in diese Modellen besser integriert werden, um Potenziale und Grenzen der Bewässerung zur Verminderung klimawandelbezogener Risiken besser zu verstehen.

Verständnis der Wechselbeziehungen im Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus verbessern

Die Verbesserung der wasserbezogenen Datenlage und der Wissensbasis in der Landwirtschaft sollte genutzt werden, um die sich durch die Verschärfungen verändernden Wechselbeziehungen im „Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus“ besser zu verstehen sowie die veränderten Wasserbedarfe der Sektoren unter verschiedenen Klimabedingungen zu projizieren. Hierfür bedarf es der Entwicklung systematischer Instrumente zur Adressierung bzw. Quantifizierung von Mehrgewinnen und Zielkonflikten, z. B. im Hinblick auf Ökosystemleistungen, was auch für Projektionen bedeutsam ist (Kap. 2.4.1.3; Caretta et al., 2022; UNESCO IHP, 2022: 33; Liu et al., 2017, 2018).

Verlagerung und Zusammensetzung zukünftiger Agrar- und Forstökosysteme verstehen und in Mosaikansatz übernehmen

Der Klimawandel führt z. T. zu einer Verschiebung von Lebensräumen, die mit der Wanderung von Arten und räumlichen Verlagerungen von u. a. gemanagten Agrar- und Forst- oder natürlichen Waldökosystemen verbunden ist, vorrangig in höhere Breitengrade oder Lagen. Arten und Ökosysteme behalten auf diese Weise das bisherige Temperaturregime mehr oder weniger bei, müssen sich aber gegebenenfalls auch an neue Umweltbedingungen anpassen. Diese Veränderungsprozesse und die Rolle des Wassers dabei sollten erforscht werden, ebenso wie Möglichkeiten, Hindernisse und geeignete Maßnahmen zur Förderung einer schrittweisen Anpassung im Ökosystemzusammenhang, z. B. durch Veränderungen in der Raumplanung zur Umsetzung des Mosaikansatzes unter Berücksichtigung der lokalen Wasserverfügbarkeit.

6.6.4

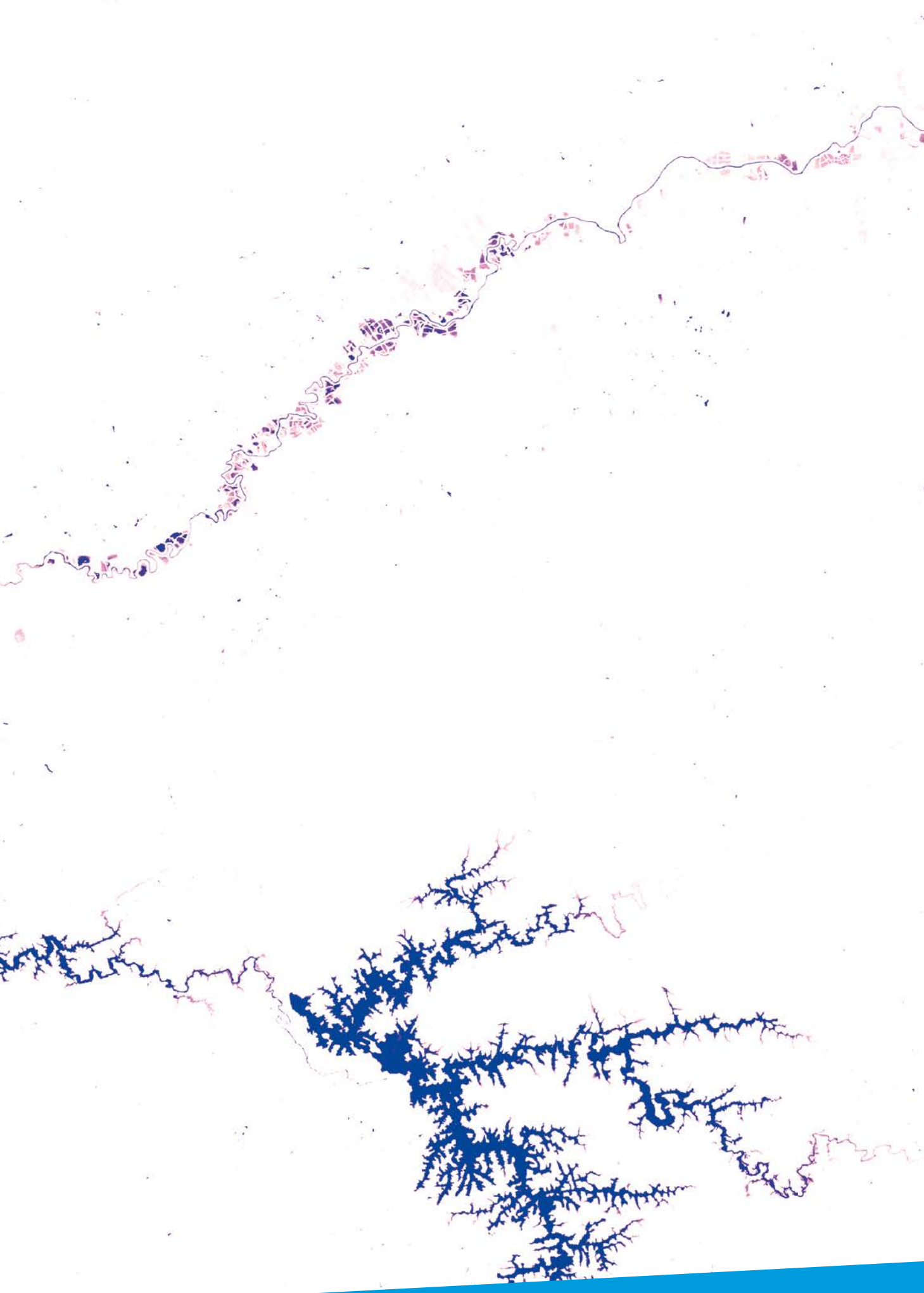
Forschungsempfehlungen zum Lösungsraum Städte

Urbaner Wassermangel und globale Urbanisierungsdynamik

Im Zeitalter der Urbanisierung sind immer mehr städtische Kommunen mit saisonaler oder dauerhafter Wasserknappheit konfrontiert. Ursachen sind limitierte Wasserressourcen bei beschleunigtem Städtewachstum, der globale Klimawandel, die wachsende Stadtbevölkerung sowie Defizite in politischen, planerischen und baulich-infrastrukturellen Entscheidungen. Zum einen sind die Maßnahmen zur Bewältigung von Wassermangel hinreichend bekannt und es fehlt vor allem an der wirksamen Umsetzung geeigneter Anpassungsmaßnahmen. Zum anderen stehen Stadtgesellschaften vor potenziell existenziellen Herausforderungen, die im Extremfall zu grundsätzlichen Entscheidungen führen, z. B. Begrenzung des Zuzugs oder Rückzug bei sich abzeichnender Unbewohnbarkeit, wenn z. B. Wassermangel die Lebensqualität massiv zu beeinträchtigen droht. Daher besteht dringender Forschungsbedarf zur effektiven Umsetzung bekannter und zur Entwicklung neuer Anpassungsmaßnahmen, zu Möglichkeiten der Überwindung der genannten Defizite sowie zu Entscheidungsprozessen in den geschilderten Extremfällen.

Anpassungsmaßnahmen im Bestand

Transformative Anpassungsmaßnahmen im Rahmen eines klimaresilienten Wassermanagements in Städten, die bereits über eine existierende Infrastruktur verfügen, erfordern innovative Ansätze für die Integration Resilienz steigernder Lösungen in bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen. Hierbei sollte insbesondere folgende Fragestellungen erforscht werden: Wie können neue Wasserbereitstellungskonzepte möglichst wenig invasiv und kostengünstig im Bestand realisiert werden? Wie können Synergien mit Anforderungen zur weitergehenden Abwasserreinigung (z. B. die geforderte Entfernung organischer Spurenstoffe im Rahmen der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie) genutzt werden, um nicht nur Gewässer stofflich zu entlasten, sondern auch alternative Wasserressourcen bereitzustellen? Das Forschungsprogramm Wasser: N bietet hierfür wertvolle Ansatzpunkte und weist auf große Potenziale zur nachhaltigen und sicheren Wasserwiederverwendung in Bezug auf aufbereitete kommunale Abwässer hin (BMBF, 2021a: 30). In der BMBF-Zukunftsstrategie Forschung und Innovation wird zudem auf die potenzielle Bedeutung für urbane Ernährungssysteme hingewiesen (BMBF, 2023: 48).



Mangelnde Wasserqualität durch Krankheitserreger, Chemikalien, Nährstoffe und Schwermetalle schadet Menschen und Ökosystemen. Das Zero-Pollution-Ziel sollte durch Schadstoffvermeidung und die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft umgesetzt werden. Wichtige Bausteine sind die globale Verbreitung der EU-Zulassungsverordnung für Chemikalien (REACH) und der EU-Kommunalabwasserrichtlinie, die Reduktion von Stoffeinträgen, die Etablierung alternativer Abwasserentsorgungskonzepte in Ländern mit niedrigem Einkommen sowie die Rohstoffrückgewinnung aus Abwässern.

Menschliche Aktivitäten beeinträchtigen die Qualität von Wasserressourcen, denn sie verursachen die Freisetzung pathogener Mikroorganismen und einer Vielzahl von gelösten und transportierten Schadstoffen. Dies führt weltweit zu erheblichen nachteiligen Konsequenzen für die menschliche Gesundheit und die Gesundheit von Ökosystemen (Kap. 2.3.3).

Die Folgen des Klimawandels verschärfen diese Situation (Kap. 3.1.4; Kap. 4.5). Dabei zeigen Extremereignisse besonders deutlich, dass Wassermenge und -qualität eng gekoppelt sind und nicht getrennt betrachtet werden dürfen: Zum einen kann es bei Hochwasserlagen zur Mobilisierung von Schadstoffen kommen (van Vliet et al., 2023). Zum anderen werden in Dürreperioden und bei niedrigen Pegelständen in Oberflächengewässern schadstoffbelastete Einleitungen durch kommunale und industrielle Abwässer sowie der Ablauf von landwirtschaftlich genutzten Flächen nur schwach verdünnt. Die höhere Schadstoffkonzentration in aufnehmenden Fließgewässern führt auch zu Sauerstoffmangel für aquatische Organismen sowie zu qualitativen Belastungen der Trinkwasserversorgung (Rice und Westerhoff, 2015; Karakurt et al., 2019). Im Sommer 2022 zeigte sich durch die massive Vermehrung einer Brackwasseralge und das daraus folgende Fischsterben in der Oder die verheerende Wirkung der Einleitung von Schadstoffen in Form von Salzen in ein Gewässer, das bereits zuvor durch erhöhte Wassertemperaturen und niedrige Pegelstände gestresst war.

Diese enge Kopplung von Wassermenge und Wasserqualität spielt bei der Erfüllung einer Vielzahl von Funktionen von Wasser eine wesentliche Rolle. Als Trinkwasser ist Wasser das wichtigste Lebensmittel. Zugleich ist es auch Transportmittel, etwa über Schwemmkanalisationen für Fäkalien und andere Abfälle aus Siedlungsgebieten. Die daraus folgenden erheblichen Aufkonzentrierungen von Schadstoffen im Wasser sowie zusätzliche Einleitungen aus Gewerbe und Industrie, etwa der Textilindustrie, überfordern regelmäßig die natürliche Selbstreinigungskraft. Daher bedarf es einer adäquaten Abwasserbehandlung. In Pflanzen gewährleistet Wasser neben der Bereitstellung von H_2O und der Transpiration auch den Zu- und Abtransport von Nährstoffen und anderen Umsetzungsprodukten. Nährstoffe werden nach der Freisetzung in Boden, Grundwässern oder Oberflächengewässern mineralisiert und dadurch für Pflanzen verfügbar. Wasser ist auch Träger von Energie: Wasserkraftwerke nutzen die kinetische Energie von Wasser aus erhöhten Lagen, thermische Energie im Wasser wird bei der Geothermie und in Kühltürmen als Verdunstungskälte genutzt.

Wasser ist folglich eine Querschnittsmaterie, die in einer Vielzahl von Bereichen eine wichtige Rolle spielt und dadurch hohe Abhängigkeiten schafft. Die aufgezeigten, lebenswichtigen Funktionen des Wassers und seiner Kreisläufe gelangen an ihre Grenzen, wenn Schadstoffe nicht mehr aus dem Wasserkreislauf entfernt werden können oder sich in Umweltmedien anreichern. Besonders problematisch sind persistente und zugleich toxische

Substanzen, die in der Nahrungskette akkumulieren (PBT-Stoffe: persistent, bioakkumulativ, toxisch) oder sehr mobil sind (PMT-Stoffe: persistent, mobil, toxisch) und sich über weite Entfernungen ausbreiten können.

Um der stetig zunehmenden Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden, insbesondere durch PBT- und PMT-Stoffe, umfassend und effektiv zu begegnen, formulierte die EU-Kommission im Rahmen des Europäischen Green Deal den „Aktionsplan Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“ (Zero Pollution), der ein Zero-Pollution-Ziel bis zum Jahr 2050 festlegt (Europäische Kommission, 2021b). Zero Pollution bedeutet, dass die Verschmutzung auf ein Niveau gesenkt wird, welches für die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen nicht schädlich ist. Zur Erreichung dieses Ziels ist das Leitbild der Kreislaufwirtschaft bedeutsam. Viele schädliche Substanzen, die für technische Prozesse essenziell sind, können bisher nicht substituiert werden. Insbesondere bei persistenten Verbindungen ist es daher notwendig, dass diese künftig in technischen Kreisläufen gehalten werden. Das Ziel der Kreislaufwirtschaft wurde von der EU-Kommission im „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“ formuliert (Europäische Kommission, 2020a). Er konzentriert sich auf den Übergang von einer linearen

zu einer zirkulären Wirtschaft, indem die nachhaltige Nutzung von Ressourcen gefördert, Abfall reduziert und die Wiederverwendung und das Recycling von Produkten und Materialien unterstützt werden.

Sowohl der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft als auch der Aktionsplan Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden (Zero Pollution) sind rechtlich verbindliche politische Strategien und Teil des Europäischen Green Deal. Sie bedürfen der Konkretisierung durch nachfolgende Maßnahmen wie den Erlass von Richtlinien und Verordnungen.

In seinem Hauptgutachten „Gesund leben auf einer gesunden Erde“ empfiehlt der WBGU, das Leitbild Zero Pollution und die zur Umsetzung notwendige Kreislaufwirtschaft auch international zu etablieren (WBGU, 2023: 204). Angesichts der erläuterten Transportfunktion von Wasser bei der Verbreitung umweltrelevanter Stoffe wird diese Empfehlung hier erneut bekräftigt. Aktuell liegt die Herausforderung darin, die Leitbilder Zero Pollution und Kreislaufwirtschaft zur Bewahrung der Wasserqualität in Wasserkreisläufen konkret umzusetzen, sowohl in Ländern mit hohem Einkommen als auch in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen.

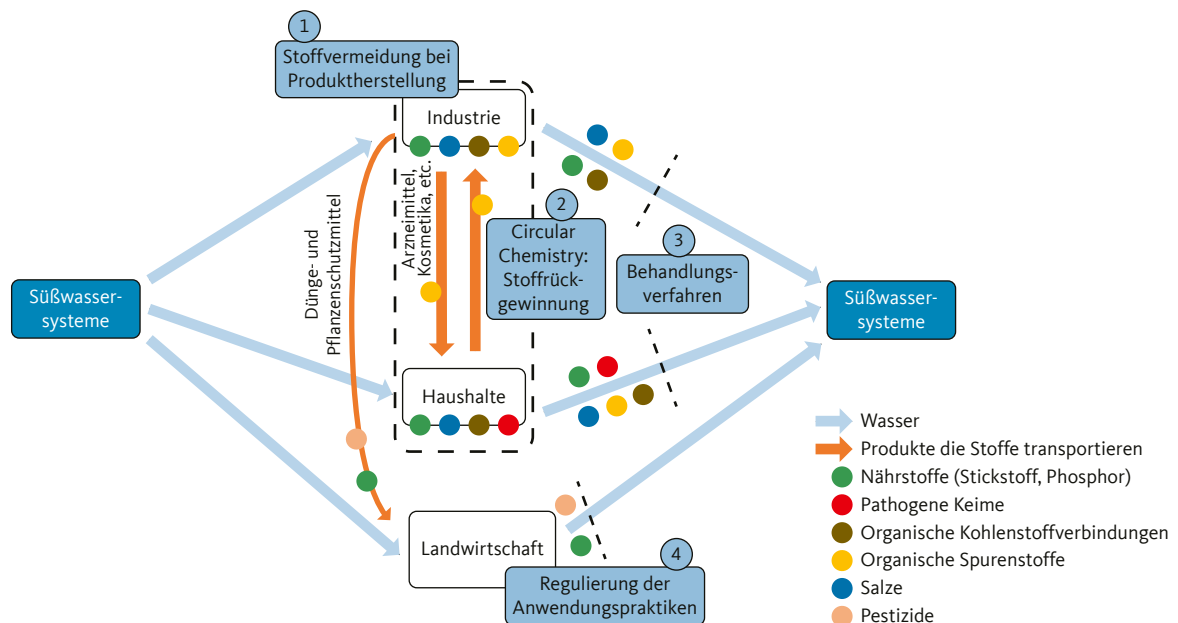


Abbildung 7.1-1

Ansätze zur Ausgestaltung und konkreten Umsetzung von Zero Pollution. (1) Stoffvermeidung bei Produktherstellung, z. B. in Folge der Beschränkung der Vermarktung und des Inverkehrbringens von Chemikalien durch EU-REACH-Verordnung; (2) Stoffrückgewinnung, z. B. von Metallen, Biopolymeren, Phosphor aus Industrie- und Kommunalabwasser im Rahmen einer Circular Chemistry; (3) Behandlungsverfahren, z. B. vierte Reinigungsstufe (wie in EU-Kommunalabwasserrichtlinie vorgesehen) oder alternative Abwassersysteme für Sammlung und Behandlung häuslicher Abwässer in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen; (4) Regulierung von Anwendungspraktiken, z. B. Maßnahmen zur Minderung der Nährstoff- und Pestizideinträge auf landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Quelle: WBGU

Das Portfolio von Ansätzen zum Schutz der Wasserqualität reicht von der Vermeidung von Stoffen bei der Produktherstellung über die Etablierung geschlossener Kreisläufe zur Stoffrückgewinnung bis hin zur Regulierung der Anwendungspraktiken in der Landwirtschaft und Behandlungsverfahren zur Minimierung der Stoffemission (Abb. 7.1-1). Welcher Ansatz notwendig ist, hängt von der Art und der Quelle der Schadstoffe ab.

Als rechtliche Steuerungsinstrumente kommen Ökodesign-Vorgaben, d. h. Anforderungen an die Vermeidung von Stoffen bereits bei der Herstellung von Produkten, präventive und repressive Verbote mit Erlaubnisvorbehalten (Stoffzulassungen), Gebote zur Stoffrückgewinnung und Behandlung von Abwasser sowie die Regulierung diffuser Quellen in Betracht, etwa in Bezug auf Schadstoffeinträge durch landwirtschaftliche Bodennutzung.

In diesem Kapitel werden innovative Ansätze diskutiert, die weltweit zur konkreten Umsetzung des Zero-Pollution-Leitbilds für unterschiedliche Arten von Verschmutzung beitragen können. Zum Beispiel können die Steuerungsansätze der Europäischen Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH; Kap. 7.1.1) und die jüngst novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie (Kap. 7.1.2) als Vorreiterkonzepte zur Umsetzung eines Zero-Pollution-Leitbilds nicht nur für die EU-Mitgliedsstaaten, sondern auch außerhalb der EU dienen. International könnte das von der UN-Umweltversammlung beschlossene Science-Policy Panel für Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung (Weltchemikalienrat) diese Steuerungsansätze aufgreifen und bei der globalen Verbreitung unterstützend wirken (Kap. 7.1.3). Darüber hinaus werden in diesem Kapitel diffuse Stoffeinträge in den Wasserkreislauf sowie Ansätze für deren Regulierung diskutiert (Kap. 7.2).

Weiterhin werden alternative Abwasserentsorgungskonzepte für Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen vorgestellt (Kap. 7.3). Mit dem Konzept „Citywide Inclusive Sanitation“ (CWIS) soll die Abwasserentsorgung und -behandlung durch den flexiblen Einsatz verschiedener zentraler und dezentraler Lösungen für alle Bevölkerungsgruppen und Stadtteile unter Berücksichtigung lokaler Ressourcen und Kapazitäten ermöglicht werden. Dies entspricht dem Leitbild Zero Pollution und folgt dem Handlungsprinzip einer gerechten Sicherstellung von Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur (Kap. 5.2.1).

Als zentrale Bausteine einer Kreislaufwirtschaft werden Ansätze zur Vermeidung von wasserbezogenen Risiken durch den wachsenden Rohstoffbedarf im Zuge der Energiewende (Kap. 7.4.1) sowie die Rohstoffrückgewinnung aus Abwässern (Kap. 7.4.2) diskutiert.

7.1

Stoffbezogenes Unionsrecht zum Schutz der Wasserqualität

7.1.1

Chemikalienrecht in der EU

In der Europäischen Union wurde mit der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH-Verordnung) ein Regulierungsansatz für Chemikalien gewählt, der neben einer Registrierungspflicht auch Vermarktungsbeschränkungen und -verbote ermöglicht. Der Regulierungsansatz der REACH-Verordnung ermöglicht, Chemikalien nach erfolgter verpflichtender Anmeldung und Bewertung einer Zulassungspflicht oder Beschränkung zu unterwerfen und setzt damit direkt bei der Produktion und dem Inverkehrbringen umweltrelevanter Stoffe an. Dies entspricht dem Handlungsprinzip der Risikovorsorge (Kap. 5.2.3). Im Zuge der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit im Rahmen des Europäischen Green Deal steht auch die Weiterentwicklung der REACH-Verordnung auf EU-Ebene an.

Der WBGU hat sich in seinem Hauptgutachten von 2023 zur Weiterentwicklung der REACH-Verordnung geäußert und bekräftigt hier die dortigen Empfehlungen (WBGU, 2023). Der in der EU vorgeschlagene Übergang von Einzelstoffbewertungen hin zu gruppenbezogenen Verboten ist zu begrüßen. Der WBGU spricht sich für ein Verbot der gesamten Stoffgruppe PFAS aus (in Anlehnung an Cousins et al., 2020), wobei begründete Ausnahmen für spezifische wesentliche Verwendungszwecke (Essential Uses) zulässig sein sollten. Um die negativen Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Umwelt möglichst gering zu halten, sollte für wesentliche Verwendungszwecke eine Pflicht zu überwachten Kreisläufen mit Rücknahmepflichten und Nachsorgemaßnahmen seitens der herstellenden Firmen und Nutzer:innen eingeführt werden.

In der im April 2024 veröffentlichten Mitteilung der EU-Kommission zu ihrem Konzept eines „wesentlichen Verwendungszwecks“ für Chemikalien definiert sie verschiedene Begrifflichkeiten: Demgemäß ist eine schädliche Substanz für eine Gesellschaft wesentlich, wenn erstens ihre Nutzung für die Gesundheit und Sicherheit notwendig oder kritisch für das Funktionieren der Gesellschaft ist, und es zweitens keine akzeptablen Alternativen gibt (Europäische Kommission, 2024a: 4). Erforderlich für die Gesundheit und Sicherheit bedeutet, dass ein Stoff notwendig ist um „Krankheiten und ähnliche gesundheitliche Probleme zu vermeiden, zu überwachen oder zu

behandeln, grundlegende Bedingungen für das Leben und die Gesundheit von Mensch oder Tier aufrechtzuerhalten, gesundheitliche Krisenfälle und Notlagen zu bewältigen, die persönliche Sicherheit zu gewährleisten oder die öffentliche Sicherheit zu gewährleisten“ (Europäische Kommission, 2024a: 4). Kritisch für das Funktionieren der Gesellschaft im Sinne der EU-Kommission ist ein Stoff, wenn er für „die Bereitstellung von Ressourcen oder Dienstleistungen, die für das Funktionieren der Gesellschaft aufrechterhalten werden müssen, z. B. Sicherstellung der Versorgung mit Energie und kritischen Rohstoffen oder der Widerstandsfähigkeit gegenüber Versorgungsunterbrechungen, oder die Bewältigung gesellschaftlicher Risiken und Auswirkungen von Naturkatastrophen und Krisen, den Schutz und die Wiederherstellung der natürlichen Umwelt oder das Betreiben wissenschaftlicher Forschung und Entwicklung oder den Schutz des kulturellen Erbes“ notwendig ist (Europäische Kommission, 2024a: 4 f.).

Die EU-Kommission betont, dass die Feststellung des „wesentlichen Verwendungszwecks“ den Kontext der Verwendung berücksichtigen soll. Für Stoffe mit wesentlichem Verwendungszweck sollen Bedingungen zur Minimierung von Emission und Exposition festgelegt werden. Die Feststellung des wesentlichen Verwendungszwecks ist nicht statisch, sondern kann aufgrund von neuen Erkenntnissen, Verwendungskontexten oder Alternativen überprüft werden. Hierfür können Fristen festgelegt werden (Europäische Kommission, 2024a: 6).

Der WBGU begrüßt dieses Konzept. Es deckt sich im Wesentlichen mit dem WBGU-Vorschlag zur Implementierung eines Bewertungsverfahrens für wesentliche Verwendungszwecke, der bereits im Hauptgutachten von 2023 basierend auf den Vorkehrungen im Montreal-Protokoll dargestellt wurde (WBGU, 2023). Gleichwohl bestehen im Konzept der EU-Kommission weiterhin große Bewertungsspielräume, die zu konkretisieren sind.

7.1.1.1

Neue Verfahren zur Chemikalienbewertung

In der Vergangenheit wurden vielfach Chemikalien in Verkehr gebracht, ohne dass Eigenschaften wie Persistenz, Bioakkumulation, Mobilität und Toxizität (PBT/PMT) in der aquatischen Umwelt ausreichend ermittelt, berücksichtigt, bewertet oder überwacht wurden. Ebenso wenig wurden vor dem Inverkehrbringen additive und synergistische Wirkungen von Stoffgemischen und Umsetzungsprodukten von Chemikalien in der Umwelt sowie Wirkungen ihrer Stoffwechselprodukte im Körper geprüft.

Die EU-REACH-Verordnung sieht eine Registrierung aller Chemikalien ab einem Produktionsvolumen von einer Tonne pro Jahr vor, die in der EU in den Verkehr gebracht werden sollen. Die ebenfalls Chemikalien regulierende Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die

Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (Classification, Labelling and Packaging, kurz CLP) ist 2009 in Kraft getreten.

Anfang 2023 veröffentlichte die Kommission die delegierte Verordnung (EU) 2023/707 zur Änderung der CLP-Verordnung in Bezug auf die Gefahrenklassen und die Kriterien für die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (Kasten 7.1-1).

Beeinträchtigungen der Wasserqualität durch Industriechemikalien lassen sich vermeiden, wenn Stoffe vor Registrierung und Inverkehrbringen auf Eigenschaften wie Persistenz, Bioakkumulation, Mobilität und Toxizität getestet werden. Vorab-Tests durch die herstellende Industrie ermöglichen eine ex-ante-Risikobewertung (vorsorgende Risikobewertung), deren Einführung substanziell zur Umsetzung des Zero-Pollution-Leitbilds beitragen würde.

Mit der Erweiterung der Gefahrenklassen in der CLP-Verordnung und der Erweiterung der Gefahrstoffklassen um PBT/PMT-Stoffe und endokrine Disruptoren (Kasten 7.1-1) nimmt der Bedarf an Chemikalienbewertung weiter zu. Die neuen Gefahrenklassen können eine deutliche Verbesserung des Gewässerschutzes zur Folge haben, da gefährliche Substanzen durch eine entsprechende Kennzeichnung stigmatisiert werden könnten. Die CLP-Verordnung fungiert damit als wichtiger Hebel zum Schutz menschlicher Gesundheit und von Gewässerökosystemen vor in der EU hergestellten und importierten Chemikalien, inklusive Pestiziden und anderen Bioziden. Allerdings mangelt es an alternativen Methoden zur Stoffbewertung, die kostenintensive und langwierige Tierversuche ersetzen könnten. „New Approach Methodologies“ (NAMs), die Experimente ohne Tierversuche an Zellen (in vitro) und Computermodelle (in silico) umfassen, bieten neue Chancen, die bestehenden Probleme bei der Chemikalienbewertung zu überwinden und bereits beim Stoffdesign negative Effekte auf Menschen und Umwelt zu vermeiden (Escher et al., 2023; Schmeisser et al., 2023).

7.1.2

Novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie

Die 2024 vom EU-Parlament verabschiedete Novelle der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG) ist ein bedeutender Meilenstein für die Bewahrung der Wasserqualität in Europa und darüber hinaus (Kasten 7.1-2; Abb. 7.1-2). Sie konkretisiert die im Rahmen des Europäischen Green Deal formulierte Zero-Pollution-Vision (WBGU, 2023: 193). Neuartig sind die finanzielle Beteiligung der Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetikprodukten an der Implementierung und dem Betrieb der vierten Reinigungsstufe (Kasten 7.1-2). Diese Pflicht entspricht dem Verursacherprinzip, indem die Kosten

Kasten 7.1-1**Die delegierte Verordnung (EU) 2023/707 der CLP-Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen**

Sowohl die REACH- als auch die CLP-Verordnung der Europäischen Union haben zur Folge, dass Daten über die inhärenten Eigenschaften von Stoffen, einschließlich physikalisch-chemischer, toxikologischer und ökotoxikologischer Informationen, gesammelt und bewertet werden müssen. Die CLP-Verordnung enthält in ihrer Ursprungsversion detaillierte Kriterien für die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung für die unter REACH fallenden Chemikalien sowie für Biozide, Pflanzenschutzmittel und Verbraucherprodukte. Sie unterteilt bisher zwei Gefahrenklassen zu physikalischen, Gesundheits- und Umweltgefahren: Gewässer gefährdend und die Ozonschicht schädigend. Die delegierte Verordnung (EU) 2023/707 trat im April 2023 in Kraft. Seit dieser Revision müssen auch endokrine Disruptoren (Stoffe, die in das Hormonsystem eingreifen können) mit Wirkung auf die Umwelt, Stoffe und Gemische mit PBT- und vPvB-Eigenschaften (persistent, bioakkumulativ und

toxisch bzw. sehr persistent und sehr bioakkumulativ) sowie Stoffe und Gemische mit PMT und vPvM-Eigenschaften (persistent, mobil im Wasser und toxisch bzw. sehr persistent und hochmobil im Wasser) ausgewiesen werden. Die Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen nach den neuen Gefahrenklassen ist ab April 2025 für neue Stoffe und ab April 2026 für neue Gemische verpflichtend. Ab Oktober 2026 bzw. April 2028 wird sie auch für bereits in Verkehr befindliche Stoffe und Gemische verpflichtend.

Die CLP-Verordnung verweist auf die Nutzung geeigneter Prüfmethoden zur Bewertung der Eigenschaften von Chemikalien. Für die Abschätzung der Umweltgefährdung werden experimentelle Daten zur Algen-, Daphnien- und Fischtoxizität gefordert. Bei der Einstufung bezüglich der Gefährdung der menschlichen Gesundheit werden fast ausschließlich Tierversuche gefordert. Ausnahme ist die Einstufung zur Hautschädigung, bei der in-vitro-Versuche (Versuche außerhalb lebender Organismen) akzeptiert sind. Die empfohlenen Prüfmethoden orientieren sich an international anerkannten Standards der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) und der EU-Verordnung zur Festlegung von Prüfmethoden zur REACH-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 440/2008).

wasserschädlichen Handelns dem Verursacher auferlegt werden. Zugleich ist sie Ausdruck des WBGU-Handlungsprinzips „Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen“ (Kap. 5.2.6). Zu kritisieren ist, dass die Kostenbeteiligung der Hersteller lediglich auf zwei Sektoren begrenzt ist (Arzneimittel, Kosmetika) und wenig Anreiz zur Stoffsubstitution durch umweltverträgliche Chemikalien bietet (Kap. 7.5.1, Kap. 8.3). Zudem fehlen konkrete Ansätze zur Anpassung des Konsumverhaltens und auch die Reduktion von Chemikalien mit persistenten Stoffeigenschaften in der aquatischen Umwelt wurde nicht berücksichtigt.

Für eine effiziente Abwasserbehandlung könnten außerdem naturbasierte Lösungen, auf Grundlage neuer Erkenntnisse der Materialwissenschaften und unter Ausnutzung zeitgemäßer biomolekularer Methoden, mit integrierten, katalytisch wirkenden Medien gekoppelt werden. Sie ermöglichen den Einsatz selektiver und leistungsfähiger Bakterien („Coupled Green-Gray Technologies“; CGGT; Castellar et al., 2022). Dies könnte den Einsatz einer neuen Generation von innovativen Biofiltern umfassen, die eine hohe desinfizierende Wirkung mit einer effizienten Transformation schwer abbaubarer organischer Spurenstoffe bei geringem Energiebedarf kombinieren, ohne problematischer Reststoffe zu produzieren (Arden und Ma, 2018; Karakurt-Fischer et al., 2020; Karakurt-Fischer et al., 2021; Karakurt-Fischer et al., 2023).

7.1.3**Globale Verbreitung und Rezeption von EU-Ansätzen**

Als Reaktion auf die Einführung des Zulassungsverfahrens gemäß der REACH-Verordnung in der EU haben eine Reihe von Staaten außerhalb der EU ihre nationalen Chemikalien-Regime dem europäischen Vorbild angenähert. Dazu zählen Australien, Kanada, China, Indien, Japan, Russland, Südkorea und die USA. Auch wenn die Motivationen für die jeweiligen Staaten unterschiedlich sind, scheinen neben strategischen und ökonomischen Interessen vor allem die Vorreiterfunktion der EU und die aktive Verbreitung der REACH-Idee durch EU-Institutionen auf bi- und internationaler Ebene ausschlaggebend gewesen zu sein (Lavenex, 2014; Bradford 2020). Es wäre wünschenswert, wenn die novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie eine ähnliche Vorbildfunktion entfalten könnte.

7.1.3.1**Globales Rahmenwerk für Chemikalien**

Im Oktober 2023 hat die Staatengemeinschaft ein rechtlich unverbindliches Globales Rahmenwerk für Chemikalien beschlossen. Der WBGU begrüßt das Rahmenwerk und seinen vorsorgenden Ansatz, der im Hauptgutachten von 2023 empfohlen wurde (WBGU, 2023). Das Globale Rahmenwerk für Chemikalien könnte als Grundlage dienen, um regionale und nationale Chemikalienregime weiterzuentwickeln, in Richtung Zero-Pollution-Ziel zu schärfen und miteinander zu verzahnen.

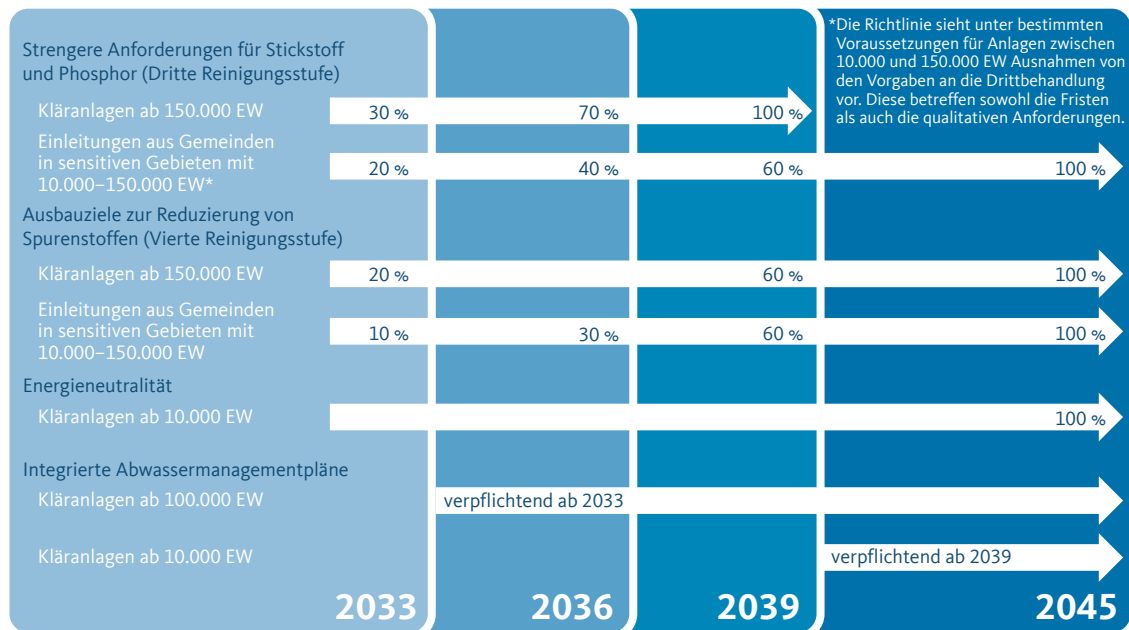


Abbildung 7.1-2

Inhalte der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie. Bis 2045 werden schrittweise neue Grenzwerte für die Entfernung von Stickstoff, Phosphor und organischen Spurenstoffen in Kläranlagen eingeführt. Darüber hinaus wird die Energieneutralität der Kläranlagen sowie die Anfertigung von integrierten Abwassermanagementplänen zur Reduktion der Einleitung ungeklärter Abwässer in Oberflächengewässer verpflichtend.

Quelle: Verband Kommunaler Unternehmen, 2024; ergänzt durch WBGU

Kasten 7.1-2

Inhalte der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG)

Im Detail enthält die novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie – auf dem Stand ihrer Verabschiedung durch das EU-Parlament im April 2024 (Europäisches Parlament, 2024a) – unter anderem folgende Inhalte (Europäischer Rat, 2024):

Abwasserbehandlung: Für die dritte Reinigungsstufe in Kläranlagen, der Entfernung von Stickstoff und Phosphor, sieht die Richtlinie eine Verschärfung der Grenzwerte vor. Die neuen Grenzwerte sollen für Anlagen ab 150.000 Einwohnerwerten (EW) ab 2039 und ab 10.000 EW bei Einleitung in eutrophierungsgefährdeten Gebieten ab 2045 verpflichtend gelten. Neu ist die Pflicht zum Aufbau einer vierten Reinigungsstufe zur Entfernung von organischen Spurenstoffen, die eine Gefahr für die menschliche Gesundheit und die Gesundheit von Ökosystemen darstellen. Sie stammen z. B. aus Arzneimitteln, Haushaltschemikalien und Kosmetikprodukten.

Erweiterte Herstellerverantwortung: Für den Ausbau und den Betrieb einer vierten Reinigungsstufe für die Spurenstoffentfernung sieht die Richtlinie eine Finanzierung von mindestens 80 % der Kosten durch die Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetikprodukten vor. Dies gilt für alle in der EU erhältlichen Produkte, unabhängig davon, ob sie innerhalb oder außerhalb der EU produziert wurden. Die Übernahme von mindestens

80 % der Betriebskosten gilt auch für Anlagen, die sich bei Inkrafttreten der Richtlinie bereits in Betrieb befinden.

Integrierte Abwassermanagementpläne: Weiterhin ist in der Richtlinie die Anfertigung von Abwassermanagementplänen vorgesehen, die für Anlagen ab 100.000 Einwohnerwerten (EW) ab 2033, ab 10.000 EW ab 2039 verpflichtend sind. Das Ziel dieser Pläne ist eine Reduktion der Mischwasserentlastungen, d. h. der Einleitung ungeklärter Abwässer in Oberflächengewässer im Falle hydraulischer Überlastung des Kanalnetzes bei Starkregen. Mischwasserentlastungen sind ein Risiko für die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen. Dieses Ziel soll durch die gesonderte Sammlung und Behandlung von wenig belastetem Regenwasser und die Vermeidung von Regenüberläufen erreicht werden, z. B. durch blau-grüne Infrastruktur in Städten (Kap. 6.4.3) erreicht werden.

Energieneutralität: Die Richtlinie enthält auch das Ziel der Energieneutralität von Kläranlagen ab 10.000 EW bis Ende 2045. Für dessen Erreichung ist der Zukauf von Energie aus erneuerbaren Quellen von bis zu 35 % erlaubt. Die Eigenproduktion von Energie ist sowohl auf dem Kläranlagengelände (on site) als auch außerhalb (off site) möglich.

Wasserwiederverwendung: Die Richtlinie sieht vor, dass die Wiederverwendung von weitergehend behandeltem Abwasser durch die Mitgliedsstaaten nach Möglichkeit gefördert werden soll. Jedoch besteht keine Verpflichtung der Mitgliedsstaaten, nationale Pläne, Ziele und Maßnahmen zur Wasserwiederverwendung zu entwickeln (Europäischer Rat, 2024).

7.1.3.2

Science-Policy Panel für Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung

Zwischenstaatliche wissenschaftlich ausgerichtete Institutionen wie der IPCC spielen mittlerweile eine zentrale Rolle für die Bekämpfung globaler Umweltveränderungen, das Ergreifen politischer Maßnahmen und die Entwicklung des Umweltvölkerrechts. Der WBGU begrüßt deshalb, dass die Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA) 2022 entschied, dass ein „Science-Policy Panel“ (SPP) eingerichtet werden soll, welches zu einem sicheren Management von Chemikalien, Abfall und der Vermeidung von Verschmutzung beitragen soll. Nach Ansicht des WBGU kann dieses Science-Policy Panel zur globalen Verbreitung und Umsetzung der Leitbilder Zero Pollution und Kreislaufwirtschaft beitragen. Dies kann allerdings nur geschehen, wenn es sich in seinen Sachstandsberichten neben der Beschreibung von Risiken, die von der Nutzung von Chemikalien ausgehen, auch den gesellschaftlichen und politischen Strategien zum Umgang mit Risiken annimmt.

Weiterhin kann der Science-Policy Panel global vorsorgendes Handeln unterstützen, wenn die systematische Suche nach und die frühzeitige Erkennung von neuen Risiken (Horizon Scanning) Teile seiner Funktionen werden. Das Panel könnte auch wichtige Erkenntnisse und Daten zur Wasserqualität für die vom WBGU vorgeschlagene Water Mapping Initiative bereitstellen (Kap. 8.4.1.3). Dazu sollte es nach Ansicht des WBGU auch in die Lage versetzt werden, Datenlücken zu schließen und datenarme Regionen bei der Erhebung relevanter Daten zu unterstützen. Für einen systemischen und umfassenden Blick auf Chemikalien und ihre Wirkungen in Wasserkreisläufen bietet sich die Etablierung einer One-Health-Perspektive an, um Risiken für Ökosystemdienstleistungen, Ökosysteme und den Menschen zu erfassen (WBGU, 2023).

7.2

Diffuse Stoffeinträge in den Wasserkreislauf

7.2.1

Pestizide und Nährstoffe

Diffuse Beeinträchtigungen der Wasserqualität durch die Landwirtschaft sind weit verbreitet, variieren aber lokal. In den Boden eingetragene Nährstoffe und Pestizide werden durch Umwelteinflüsse mobilisiert und verbreiten sich häufig durch Wassertransport in Böden, Gewässern und der Luft. Sie wirken auch auf Boden- und Wasserorganismen sowie den Menschen ein (Haygarth et al., 2005). Der Zero-Pollution-Aktionsplan und die

Farm-to-Fork-Strategie der EU beabsichtigen die Senkung der Nährstoffverluste und des Einsatzes chemischer Pestizide bis 2030 im Vergleich zum Referenzzeitraum von 2013 bis 2017 um 50 %.

Nährstoff- und Pestizideinträge können durch eine Umstellung der Produktion auf alternative Systeme wie Agroforstwirtschaft, Aquaponik, konservierende Landwirtschaft, Präzisionslandwirtschaft, pfluglose Landwirtschaft, Wurzelintensivierung, den Einsatz von Biodünger sowie gezielte finanzielle Abgaben wie eine Pestizidsteuer gesenkt werden (Kap. 6.3.2). Diese Maßnahmen sind wissenschaftlich untersucht und können einen wertvollen Beitrag zur Optimierung von Nährstoffkreisläufen sowie zur Reduktion von Bioziden in Wasserkreisläufen leisten. Auch für Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen wird durch die Wissenschaft die Umsetzung einer ertragreichen und zugleich ressourcenschonenden Landwirtschaft empfohlen, die verstärkt alternative Methoden anwendet (Adediji et al., 2020; Adegbeye et al., 2020; Frimpong et al., 2023; Solomon et al., 2016; Tschora und Cherubini, 2020).

Im WBGU-Hauptgutachten „Landwende im Anthropozän“ wurden verschiedene alternative landwirtschaftliche Maßnahmen und Produktionssysteme vorgestellt und bewertet (WBGU, 2020). Auch für die nächste Förderperiode der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU nach 2027 sind diese zu empfehlen. Maßnahmen mit großer Relevanz für den Schutz der Wasserqualität werden durch den WBGU erneut bekräftigt (Kap. 7.5.2).

Alle Maßnahmen sind mit Mehraufwand für Landwirt:innen verbunden, der je nach Anwendungsfall variiert. Deswegen müssen Ausgleichsmaßnahmen, wie etwa finanzieller Ausgleich, und Planungssicherheit für Betriebe aller Größen gewährleistet werden (Kap. 6.5.1.3). Ein ergebnisorientierter Ausgleich nach dem Augsburger Modell ist aus Sicht des WBGU wünschenswert (Barataud et al., 2014; Wezel et al., 2016). Hierbei werden etwaige Verluste durch Ausgleichszahlungen kompensiert, wenn die geforderte Wasserqualität auf den bewirtschafteten Flurstücken eingehalten wird. In besonders verschmutzungssensiblen Gebieten kann dies mit der Förderung einer ökologischen Landwirtschaft verbunden sein (WBGU, 2020: 163). Die deutsche Bundesregierung adressierte den übermäßigen Eintrag von Nährstoffen teilweise durch die Düngeverordnung (DüV). Das mit der DüV verbundene nationale Monitoring-Programm für Stickstoff und Phosphor sollte auch auf andere Stoffe wie Pestizide und deren Metabolite ausgeweitet werden.

7.2.2 Pharmazeutika

In Abwässern und Prozesswässern von Tierhaltungs- und Tierverarbeitungsbetrieben sind weltweit antimikrobielle Resistenzen (AMR) nachgewiesen worden (Kasten 7.2-1). Sie gehen mit einer hohen Infektionsgefahr für das Personal mit Kontakt zum Tier einher (Foyle et al., 2023; WBGU, 2023; Werner et al., 2023; SRU, 2023). Zudem können resistente Keime über Abluft und Austrag von Gülle in Böden und Gewässer gelangen (Abb. 7.2-1). Die Verabreichung von Antibiotika in der Nutztierhaltung ist in Deutschland im Vergleich zu anderen EU-Mitgliedstaaten hoch (Tsilimekis, 2023). Der Zero Pollution Action Plan der EU sieht eine Minderung des Verkaufs von Antibiotika, die für Nutztiere und Aquakultur bestimmt sind, um 50 % bis 2030 vor.

Maßnahmen gegen Antibiotika-Rückstände im Abwasser können in zentralen, leitungsgebundenen Abwassersystemen mit Kläranlagen gut umgesetzt werden. In dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersystemen sind Maßnahmen unter Umständen finanziell und technisch aufwändiger umzusetzen. Die Gefahr der diffusen Ausbreitung von AMR kann im Vergleich zur Behandlung in Kläranlagen, insbesondere bei einer installierten, auf die Entfernung von AMR optimierten vierten Reinigungsstufe, in dezentralen Abwassersystemen erhöht sein (Hiller et al., 2019).

Auch der weltweit zunehmende Einsatz von Hormonen und anderen Tierarzneimitteln in der Nutztierhaltung spielt eine immer stärkere Rolle bei der Verschmutzung von Gewässern aus diffusen Quellen (Kap. 3.3.2.1). Bessere Haltungsformen reduzieren die Einträge, bei gleichzeitiger Stärkung der Tiergesundheit. Weniger Fleischkonsum führt zu weniger Belastung von Gewässern durch resistente Pathogene, Antibiotika, Hormone und andere Tierarzneimittel, bei gleichzeitigen Vorteilen für die menschliche Gesundheit (WBGU, 2023).

Richtungsweisende Ansätze zur Vermeidung von AMR sind die Deutsche Antibiotika-Resistenzstrategie (DART) 2030, die deutsche Unterstützung der Joint Programming Initiative on Antimicrobial Resistance (JPIAMR) durch das BMBF sowie die strategischen Ansätze der EU für Arzneimittel in der Umwelt und zur Vermeidung von Antibiotikaresistenzen. Auch die gemeinsamen Initiativen aus der Kooperation von Welternährungsorganisation (FAO), Weltgesundheitsorganisation (WHO), UN-Umweltprogramm (UNEP) und Weltorganisation für Tiergesundheit (WOAH) zur Eindämmung antimikrobieller Resistenzen (AMR) sind beispielhaft (WBGU, 2023).

7.2.3 Mikroplastik

Im Rahmen des Zero Pollution Action Plan sieht die EU eine Reduzierung des in die Umwelt freigesetzten Mikroplastiks um 30 % bis 2030 vor. Mit der 2023 in Kraft getretenen Verordnung (EU) 2023/2055 wurde bereits ein Schritt in diese Richtung gemacht. Die Verordnung ändert die REACH-Verordnung dahingehend, dass die Verwendung von synthetischen Polymermikropartikeln u. a. in Kosmetika, Sportplatzgranulaten, Pestiziden und Arzneimitteln verboten wird. Auch die beschlossene nächste EU-Abgasnorm Euro 7 für Fahrzeuge sieht ab 2028 erstmals Grenzwerte für den Bremsbelag- und Reifenabrieb von Personenkraftwagen und Kleintransportern vor. Abrieb ist eine wesentliche Ursache der diffusen Verschmutzung von Luft und Wasser durch Mikroplastik.

Angeichts der prognostizierten Zunahme von Plastikprodukten sowie des motorisierten Individualverkehrs könnten die EU-Maßnahmen, auch in Kombination mit dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft und des derzeit noch in Verhandlung befindlichen weltweiten Plastikabkommens, unzureichend sein (OECD, 2022b; Kap. 8.1).

Kasten 7.2-1 Antimikrobielle Resistenzen

Gegen Antibiotika resistente Bakterien können die Gensequenzen, die für die Resistenz verantwortlich sind, leicht auf andere Bakterien übertragen. Sobald ein Bakterium gegen mehr als drei Antibiotikaklassen resistent ist, wird von einer Multiresistenz gesprochen. Da alle Menschen und Tiere Darmbakterien beherbergen, die Resistenzen ausbilden können, birgt jede Antibiotika-Gabe das Risiko einer Resistenzentwicklung. Im Sondergutachten 2023 des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) wurden die zunehmenden antimikrobiellen Resistenzen und ihre Gefahren für Menschen ausführlich thematisiert

(SRU, 2023). Insbesondere vulnerable Menschen sind durch Antimikrobielle Resistenzen (AMR) gefährdet, jedoch können alle Menschen Träger multiresistenter Keime werden und durch sie erkranken, nachdem sich diese über Luft, Wasser oder Böden verbreitet haben (Westphal-Settele et al., 2018). Bei einer Infektion mit multiresistenten Bakterien sind die Behandlungsmöglichkeiten deutlich eingeschränkt und Betroffene können oft nur mit Reserveantibiotika behandelt werden. Sind diese ebenfalls wirkungslos, kann sich auch für einen sonst gesunden Menschen eine lebensbedrohliche Situation entwickeln. Um der zunehmenden Ausbildung von Resistenzen entgegenzuwirken, unterstützt der WBGU die Empfehlungen des SRU zur Eindämmung der Resistenzentwicklung (SRU, 2023).

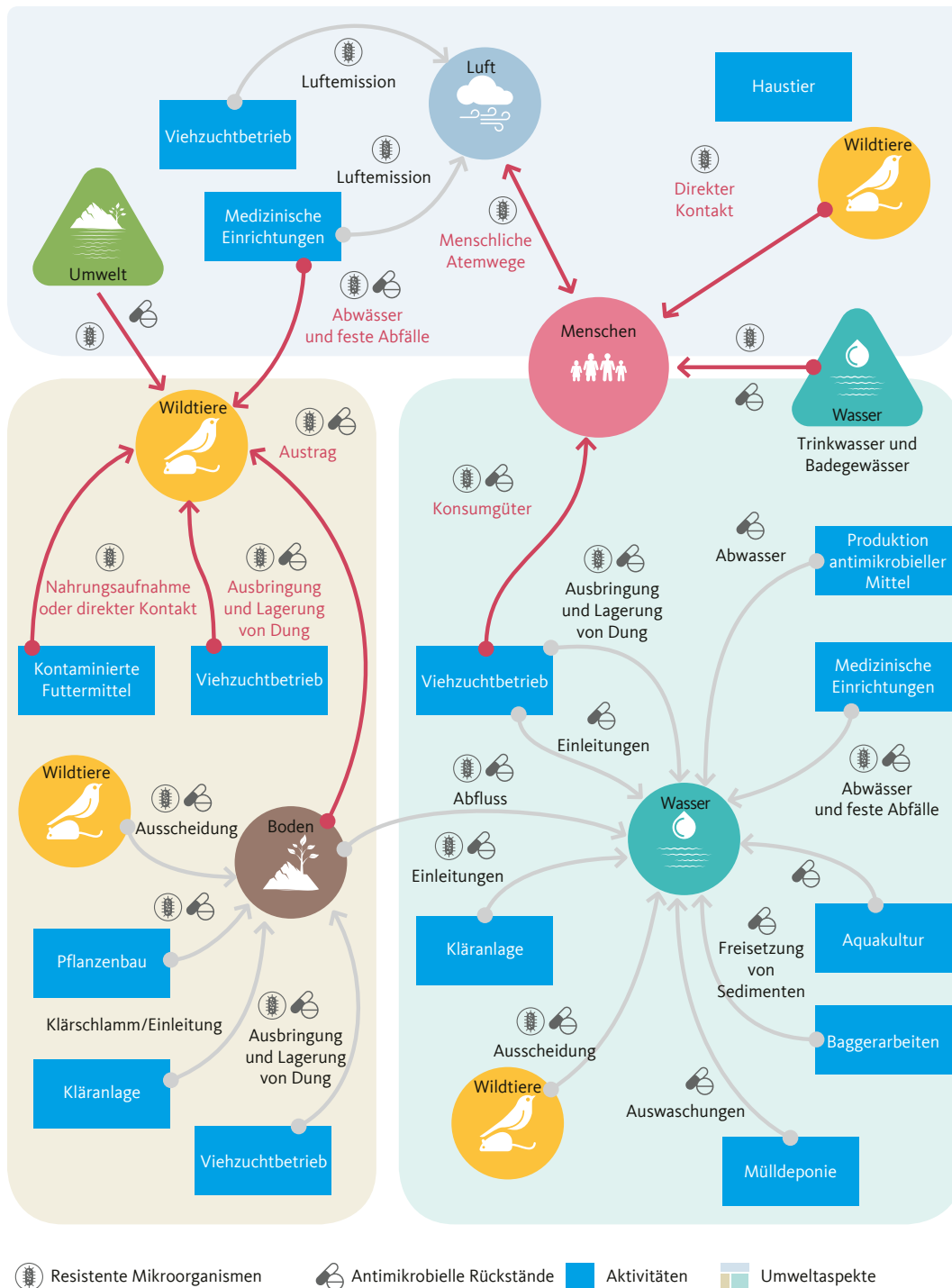


Abbildung 7.2-1

Übertragung und Verbreitung von antimikrobiellen Resistenzen über die Umwelt. Dargestellt sind die Verbreitungswege (graue Pfeile) von antimikrobiellen Resistenzen sowie Möglichkeiten ihrer Übertragung auf Tiere den Menschen (rote Pfeile).
Quelle: UNEP, 2023

Der vermehrte Einsatz von Folien in der Landwirtschaft, Farb- und Schutzlacken sowie Holzersatzprodukten aus Kunststoff lässt in der Zukunft eine weitere Zunahme von Mikroplastik durch Abrieb und UV-bedingte Zersetzung und dessen Eintrag in die Gewässer erwarten – verbunden mit ernststen Folgen für Wasserorganismen und der Kontamination von Trinkwasser.

7.3

Alternative Abwasserentsorgungskonzepte in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen

7.3.1

Flexibler Einsatz zentraler und dezentraler Abwassersysteme

Die Ausbringung ungeklärter häuslicher Abwässer ist in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen (LMIC) eine Hauptursache für die Verschmutzung von Oberflächengewässern mit Pathogenen, organischen Kohlenstoffverbindungen und Nährstoffen, die der Gesundheit von Menschen und Ökosystemen schadet (Kap. 2.3, Kap. 4.5). Informelle Siedlungen sind hiervon besonders betroffen. Im Kontext der verschiedenen Ansätze zur konkreten Umsetzung von Zero Pollution (Abb. 7.1-1) ist eine Behandlung des häuslichen Abwassers der wirkungsvollste Ansatz zur Reduzierung dieser Stoffeinträge in Oberflächengewässer. Dafür wurde von internationalen Mittelgebern und lokalen Entscheidungsträgern lange der kostenintensive Aufbau zentraler Abwassersysteme mit ausgedehnten Kanalnetzen nach Vorbild von Ländern mit hohem Einkommen favorisiert (Heidler et al., 2023). Für viele formelle und insbesondere informelle Siedlungen in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen ist eine zentrale Abwasserbehandlung jedoch nicht standortgerecht und somit als universelle Lösung zur Abwasserentsorgung ungeeignet (Gambrill et al., 2020; Kap. 4.5).

Seit einigen Jahren gewinnen alternative Konzepte wie Citywide Inclusive Sanitation (CWIS) an Bedeutung, bei dem der Fokus auf angepassten Lösungen und einem gerechten Zugang aller Bevölkerungsgruppen und Stadtteile zu Trinkwasser, Sanitärversorgung und Hygiene liegt (Lüthi et al., 2020). Bei CWIS werden Abwasserentsorgung und -behandlung als Servicekonzept statt als reine Infrastrukturversorgung begriffen. Es umfasst eine Abwasser-Dienstleistungskette aus Sammlung, Leerung, Transport, Behandlung sowie Entsorgung oder Wiederverwendung (Heidler et al., 2023). Verschiedene technische Komponenten (wie zentrale, leitungsgebundene Abwassersysteme oder dezentrale,

nicht leitungsgebundene Abwassersysteme mit Fäkal-schlamm-Management) können dabei flexibel zum Einsatz kommen, um einen hygienischen Umgang mit Abwasser lokal angepasst zu ermöglichen (Narayan et al., 2021). Ein wichtiges Charakteristikum der dezentralen nicht leitungsgebundenen Lösungen ist, dass keine Schwemmkanalisation zum Einsatz kommt, in der Wasser Fäkalien transportiert. Daher wird weniger Wasser gebraucht und eine Schadstoffausbreitung in der aquatischen Umwelt deutlich reduziert.

Zentrale Abwassersysteme werden auch in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen von Abwasserbetrieben verwaltet. In Stadtteilen, die nicht an zentrale Abwassersysteme angeschlossen sind (häufig informelle Siedlungen), finden sich oft unsichere, dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme wie undichte Latrinengruben. Des Weiteren finden Entleerungen ohne Hygieneschutz sowie die Entsorgung von Fäkalschlamm in Oberflächengewässern statt (Kap. 4.5). Informelle Arbeitskräfte, die bei der Bewirtschaftung dezentraler Abwassersysteme tätig sind, sind enormen gesundheitlichen Risiken ausgesetzt, werden oft schlecht bezahlt und stigmatisiert (WHO und UNICEF, 2020: 71 f.). Darüber hinaus stellen die unsicheren Praktiken ein Risiko für die Gesundheit der Bevölkerung und für Ökosysteme dar. Dem CWIS-Konzept folgend können die bestehenden dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersysteme formalisiert und durch Fäkalschlamm-Management und Hygienemaßnahmen verbessert werden (Fallbeispiel Lusaka: Kap. 7.3.2).

Nach der ersten Publikation der Prinzipien von CWIS im Jahr 2016, unter anderem durch die Weltbank, die Bill und Melinda Gates-Stiftung und die University of Leeds, haben viele weitere Akteure das Konzept aufgegriffen, z. B. die International Water Association und die Asian Development Bank (ADB, 2021; Lüthi et al., 2020; IWA, 2022). Auch die Afrikanische Union hat in ihren African Sanitation Policy Guidelines die komplementären Rollen konventioneller zentraler, leitungsgebundener und hygienischer dezentraler, nicht leitungsgebundener Abwassersysteme anerkannt (AMCOW, 2021: 39). In Kenia plant die Regierung eine landesweite Abwasserentsorgung zu 40 % über konventionelle, zentrale Abwassersysteme und zu 60 % über dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme umzusetzen (World Bank, 2023c: 3).

Der WBGU begrüßt die Initiative der verschiedenen staatlichen und privaten Akteure, über den flexiblen und angepassten Einsatz verschiedener Technologien die Einleitung pathogener Mikroorganismen und chemischer Stoffe aus ungeklärten häuslichen Abwässern in Wasserkreisläufe zu reduzieren. Dies folgt dem Handlungsprinzip der Sicherstellung von Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur (Kap. 5.2.1).

7.3.2

Praxisbeispiel: Das Lusaka Sanitation Program

Die folgende Fallstudie illustriert die konkrete Umsetzung des flexiblen Einsatzes zentraler und dezentraler Abwasserentsorgungssysteme am Beispiel des Aufbaus eines Fäkalschlamm-Managements (FSM) in Lusaka (Sambia). Das Praxisbeispiel verdeutlicht, dass für eine erfolgreiche Verbesserung dezentraler, nicht leitungsgebundener Abwassersysteme neben dem Aufbau technischer Infrastruktur auch die Anpassung des institutionellen und organisatorischen Rahmens erforderlich ist. Das Lusaka Sanitation Program kann auch als Beispiel für eine transformative Stadtgestaltung im Sinne klimaresilienten urbanen Wassermanagements dienen (Kap. 6.4), bei dem der Fokus auf Wasserqualität und dem sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser und Sanitärinfrastruktur für alle Stadtbewohner:innen liegt. Anhand des Beispiels lassen sich zudem die Anforderungen an die Auswahl, Kombination und Entwicklung von Maßnahmen im Rahmen eines klimaresilienten Wassermanagements veranschaulichen. Dazu gehören insbesondere die Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext und die stärkere Berücksichtigung möglicher Mehrgewinne (Kasten 6.2-1; Kap. 6.2.2).

70 % der 2,5 Mio. Einwohner:innen Lusakas leben in informellen Siedlungen, die durch eine hohe Bevölkerungsdichte, geringen Wohnstandard und fehlende öffentliche Infrastruktur geprägt sind. 90 % von ihnen nutzen Latrinengruben, 9 % zentrale, leitungsgebundene Abwassersysteme oder Klärtanks und 1 % praktizieren offene Defäkation (Simwambi et al., 2023).

Rechtlich sind die Haushalte für den Bau und die Instandhaltung der Latrinengruben und die Stadtverwaltung für deren Kontrolle verantwortlich. Praktisch erfolgt die Kontrolle aufgrund mangelnder Kapazitäten nur unvollständig, weshalb die Qualität der Sanitäranlagen stark variiert. Viele der Latrinengruben sind nicht abgedichtet und somit eine Gefahr für die Wasserversorgung, die zu 60 % aus oberflächennahem Grundwasser gespeist wird. So treten Typhus-, Dysenterie- und Cholera-Ausbrüche regelmäßig in den informellen Siedlungen von Lusaka auf (Hubbard et al., 2020; Simwambi et al., 2017; Gething et al., 2023).

Die Leerung der Latrinengruben erfolgte bis zum Beginn der FSM-Projekte durch Saugwagen oder manuell und überwiegend ohne Hygieneschutz durch Haushaltsmitglieder oder informelle, unregulierte Dienstleister (Simwambi et al., 2017). Da vor Beginn der FSM-Projekte keine Behandlungsmöglichkeit für entfernten Fäkalschlamm zur Verfügung stand, wurde er in der Nähe der Latrinengruben vergraben oder in nahegelegenen Gräben und Oberflächengewässern entsorgt. Insbesondere während der Regenzeit können offene Latrinengruben überlaufen und der vergrabene Fäkalschlamm

aufgeschwemmt werden. Im Kontext des für Lusaka prognostizierten klimawandelbedingten Anstiegs der Starkregenereignisse stellt dies eine zusätzliche Gefahr für die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen dar (Libanda et al., 2024).

Zwischen 2012 und 2015 wurde von der Lusaka Water and Sewerage Company (LWSC), dem Wasserver- und Abwasserentsorgungsunternehmen der Stadt Lusaka, ein Projekt zum Aufbau eines FSM in den informellen Siedlungen Kanyama und Chazanga durchgeführt. Das Projekt wurde von der Nichtregierungsorganisation (NGO) Water and Sanitation for the Urban Poor finanziert und von den NGOs Water and Sanitation Association of Zambia und Bremen Overseas Research and Development Association durchgeführt. In diesem Projekt wurden zwei Fäkalschlamm-Behandlungsanlagen mit Schlamm-lagertanks, Rechen für Abtrennung von Feststoffabfall, Faulbehältern zur Biogas-Erzeugung sowie Schlamm-trocknungsbeeten errichtet. Diese Behandlungsanlagen sind im Besitz der LWSC und stehen unter der Aufsicht der lokalen Verwaltung, werden aber von Organisationen von Stadtbewohner:innen betrieben. Die Entleerung der Latrinengruben und der Transport des Fäkalschlammes zu den Behandlungsanlagen erfolgt durch Angestellte des Water Trusts, die von den informellen Dienstleistern rekrutiert, fortgebildet und ausgerüstet wurden (Klinger et al., 2019; Simwambi et al., 2017).

Nach dem erfolgreichen Pilotprojekt in Kanyama und Chazanga wurde 2015 von der LWSC das stadtweite Lusaka Sanitation Program begonnen, das bis 2024 läuft. Dieses Projekt wird mit insgesamt 300 Mio. US-\$ von der Weltbank, der Afrikanischen Entwicklungsbank, der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und der Europäischen Investitionsbank gefördert und folgt durch die Kombination von zentralen und dezentralen Abwassersystemen dem CWIS-Konzept (Huang, 2022). Ziele sind die Vergrößerung und Verbesserung des Kanalnetzes, der Bau von Sanitäranlagen und Fäkalschlammbehandlungsanlagen für dezentrale Abwassersysteme sowie die Verbesserung des FSM in periurbanen informellen Siedlungen. Darüber hinaus soll die institutionelle Kapazität der LWSC zum Management von Abwassersystemen in Lusaka verbessert werden (Huang, 2022).

2022 wurden zwei Projektziele, 3.500 neu gebaute Sanitäranlagen für dezentrale Abwassersysteme und Leerung von 13.000 Latrinengruben, erreicht. Der Bau einer neuen Anlage zur Behandlung von Fäkalschlamm war jedoch erst zu 25 % abgeschlossen (Huang, 2022). Außerdem wurde aufgrund von gestiegenen Kosten das ursprüngliche Ziel, 90.000 Menschen mit verbesserten Sanitärbedingungen zu versorgen, auf 75.000 reduziert. 2022 waren bereits 68.000 erreicht (Huang, 2022).

Im Zuge des Lusaka Sanitation Program wurde zudem der institutionelle und organisatorische Rahmen des

Abwassersystems in Lusaka angepasst. Die Leerung der Latrinengruben und der Transport von Fäkalschlamm wurden als Aufgabenbereiche der LWSC zugewiesen, die auch Genehmigungen an die Water Trusts und private Dienstleister vergeben soll. Diese sind wiederum der LWSC gegenüber berichtspflichtig (CWIS, 2021). Damit wurde ein wichtiger Schritt in Richtung Formalisierung und Anerkennung bestehender dezentraler Abwassersysteme vollzogen (Kap. 7.5.5). Darüber hinaus wurde das Lusaka Sanitation Program von 2016 bis 2020 durch ein Projekt der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) begleitet. Es hatte zum Ziel, durch Qualifizierungsprogramme, Koordination zwischen den Akteuren, Compliance-Monitoring und verbesserte Managementpraktiken die Voraussetzungen für eine klimaverträgliche Sanitärversorgung und FSM in informellen Siedlungen zu schaffen.

Seit dem Beginn der FSM-Projekte zur Verbesserung der dezentralen Abwassersysteme wurden verschiedene begünstigende Faktoren, Limitationen und Mehrgewinne identifiziert. Zum Beispiel erwiesen sich die starke Einbindung der lokalen Bevölkerung über die Water Trusts, die Kapazitätsentwicklung bei vormals informellen Dienstleistern, Kampagnen zur Aufklärung über gesundheitliche Vorteile sowie die Rolle und Dienstleistungen der Water Trusts als positive Einflussfaktoren auf die Akzeptanz des FSM durch die lokale Bevölkerung (Simwambi et al., 2017).

Auf der Seite der Limitationen ist zu nennen, dass die Latrinengruben von der Bevölkerung zum Teil zur Entsorgung von Abfällen genutzt werden. Entsprechend bestehen 22 % des Schlammes in den Latrinengruben aus Feststoffabfällen, die den Einsatz von Saugwagen erschweren, sodass die Leerung überwiegend manuell erfolgen muss (Simwambi et al., 2023; Klinger et al., 2019). Die Feststoffabfälle können auch zur Verstopfung der Behandlungsanlagen für Fäkalschlamm führen. Seit der Inbetriebnahme der Anlagen kam es mehrfach zu temporären Schließungen aufgrund von Betriebs- und Instandhaltungsproblemen. Dementsprechend wichtig sind motivierte und qualifizierte Arbeitskräfte, um Verstopfungen, Fehlnutzungen und Ausfallzeiten zu vermeiden (Klinger et al., 2019).

Selbst bei einem optimierten und reibungslosen Betrieb ist die maximale Aufnahmekapazität der Behandlungsanlagen eine weitere Limitation. So wurde die Anlage in Kanyama nur für die Aufnahme des Fäkalschlammes von 30.000 der insgesamt 250.000 Einwohner:innen erbaut (Simwambi et al., 2017). Ein Jahr nach Abschluss des Projektzeitraums (2016) wurden 11 % der Latrinengruben in Kanyama von Mitarbeitern des Water Trusts geleert und zur Behandlungsanlage gebracht, wohingegen 30 % von Saugwagen und 59 % von Haushalten oder informellen Dienstleistern geleert wurden (Simwambi et al., 2017).

Da die Behandlungsanlage ihre Kapazitätsgrenze erreicht hat, ist eine Erhöhung ihres Anteils an der Fäkalienentsorgung ohne Erweiterung nicht möglich (CWIS, 2021).

Auf der Seite der Mehrgewinne des FSM steht, dass getrockneter Schlamm nach Behandlung als Dünger verkauft werden kann. In Kanyama und Chazanga ist dies jedoch noch nicht erfolgt (Simwambi et al., 2017). Auch das Biogas aus der Faulung des Fäkalschlammes ist weiter verwertbar. Es sollte ursprünglich an umliegende Haushalte verkauft werden. Da die Hauseigentümer:innen aber keine Erlaubnis für den Bau von Gasleitungen erteilten, wird das Biogas stattdessen durch den Water Trust intern für den Betrieb der Kantine genutzt (Simwambi et al., 2017). Ein weiterer Mehrgewinn ist, dass die vormals informell tätigen Personen als Mitarbeiter:innen des Water Trusts von einer Formalisierung ihrer Arbeit (verbunden mit den Vorteilen einer regulären Anstellung, einem stabilen Einkommen und sicheren Arbeitsbedingungen) und einem sozialen Empowerment durch die Aufwertung ihrer Arbeit profitierten (Simwambi et al., 2017).

Eine offene, FSM-Konzepte allgemein betreffende Frage, ist die Entwicklung eines Geschäftsmodells, das ohne externe finanzielle Hilfen tragfähig ist. In Kanyama und Chazanga muss, trotz der Einnahmen durch die Leerung der Latrinengruben, das FSM durch Einnahmen des Water Trusts aus der Wasserversorgung bezuschusst werden, um die Preise konkurrenzfähig und für die Bevölkerung erschwinglich zu halten.

7.4 Effekte der Energiebereitstellung auf die Wasserqualität

Der Energiesektor ist global der zweitgrößte Wasserverbraucher nach der Landwirtschaft und in einigen Ländern für bis zu 40 % des Wasserverbrauchs verantwortlich (Lohrmann et al., 2023). Ein zukünftig stärker schwankendes Wasserdargebot und wasserbezogene Extremereignisse können die Energieerzeugung gefährden (Kasten 7.4-1). Im Rahmen der Energiewende ändert sich mit den eingesetzten Kraftwerkstechnologien auch der quantitative Wasserverbrauch des Energiesektors (Kasten 7.4-2).

Gleichzeitig ändern sich die Auswirkungen der Energiebereitstellung auf die Wasserqualität, wenn zukünftig weniger fossile Brennstoffe abgebaut oder mehr und andere Materialien für Energiekonversions- und Speichereinrichtungen benötigt werden, etwa seltene Erden oder Lithium (Kap. 7.4.1). Die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser gewinnt in diesem Zusammenhang eine noch größere Bedeutung (Kap. 7.4.2).

7.4.1

Auswirkungen der Stromerzeugung auf die Wasserqualität

Die Energiewende ist auch eine Ressourcenwende mit großer Wasserrelevanz: Die Umwandlung und Speicherung von Energie haben je nach genutzter Technologie unterschiedliche Auswirkungen auf die Wasserqualität. Wasserverschmutzung entsteht bei der Gewinnung und Weiterverarbeitung der Energieträger, der Gewinnung der notwendigen Rohstoffe für den Bau von Kraftwerken und Speichern, bei ihrer Nutzung sowie bei ihrem Abbau und Recycling. Im Folgenden wird kurz auf die Wasserverschmutzung beim Abbau fossiler Energieträger eingegangen. Anschließend wird exemplarisch die Wasserverschmutzung beim Abbau von Lithiumsalzen, die für die Herstellung von Energiespeichern notwendig sind, dargestellt. Es werden zudem Lösungen zu ihrer Reduktion und Vermeidung erläutert, um zu veranschaulichen, welche Herausforderungen für den Schutz der Wasserqualität durch die Energiewende bestehen und wie ihnen durch die Anwendung der Leitbilder Zero-Pollution und Kreislaufwirtschaft begegnet werden kann (Abb. 7.1-1). Ein Teil der Lösung ist die Rohstoffrückgewinnung (Kap. 7.5.5).

7.4.1.1

Verschmutzung durch fossile Energieträger

Die Gewinnung und Aufbereitung fossiler Energieträger generieren hohe Mengen Abfall mit teilweise toxischen Stoffen, die in Gewässer gelangen können. Das Prozessabwasser selbst wird innerhalb des Gewinnungsprozesses jedoch häufig gereinigt und wiederverwendet (Kalisz et

al., 2022). Starke Verschmutzung umliegender Gewässer durch Sulfate, Metallionen usw. wurde etwa bei der Kohlegewinnung durch Gipfelbergbau (Mountaintop removal mining) festgestellt. In den USA leben ca. 1,2 Mio. Menschen in Gebieten, in denen Kohle durch Gipfelabsprengung gewonnen wird. Dabei wurden Flussläufe auf einer Gesamtlänge von etwa 2.000 Meilen durch Abraum verschüttet. Auswirkungen werden noch für Jahrzehnte nach der Gewinnung prognostiziert (Hendryx et al., 2020).

Auch der Untertageabbau von Steinkohle hat erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der Wasserressourcen. Saure Grubenwässer, die durch das Eindringen von Oberflächenwasser und Oxidation von Mineralen entstehen, zählen zu den größten Verschmutzungsquellen im Kohleabbau. Etwa wurden durch Grubenwasser gelöste Schwermetallionen in benachbarten Wasserressourcen festgestellt, z. B. kontaminiertes Grundwasser in indischen Kohlebecken (Finkelman et al., 2021; Masood et al., 2020).

Des Weiteren wurden durch die Verbrennung von Kohle Verunreinigungen von Wasser und Boden durch polyzyklische Kohlenwasserstoffe, Quecksilber, Arsen, Chrom und weitere Stoffe festgestellt. Sie stammen u. a. aus der auf Halden gelagerten Kohleasche (Hendryx et al., 2020; Finkelman et al., 2021).

In der Öl- und Gasförderung sind die eingesetzten Bohrflüssigkeiten die größte Abfallmenge und eine potenzielle Verschmutzungsquelle für Gewässer. Zwar werden in manchen Ländern, wie den USA, etwa 90 % der Flüssigkeit im Prozess wiederverwendet, bei falscher Entsorgung oder Leckagen können jedoch in der Flüssigkeit enthaltene schädliche Stoffe wie Toluol in Grund- und Oberflächengewässer gelangen (Pereira et al., 2022;

Kasten 7.4-1

Ein schwankendes Wasserdargebot kann den Kraftwerksbetrieb gefährden

Durch den Klimawandel stärker schwankende Niederschläge und veränderte Gesamtwassermengen bzw. Oberflächenabflüsse (Berga, 2016; Kap. 2; Kap. 3) beeinflussen die künftig erzeugbaren Strommengen. Wassermangel und erhöhte Wassertemperaturen können die Kapazität thermischer Kraftwerke einschränken und vorübergehende Stilllegungen nötig machen. Insbesondere Kernkraftwerke sind davon betroffen, da sie sicherheitsbedingt einen hohen Wasserentnahmebedarf haben (Jin et al., 2019b). Eine Studie von van Vliet et al. (2016) prognostiziert, dass in den Jahren 2040–2069 weltweit bis zu 74 % der Wasserkraftwerke und 86 % der thermoelektrischen Kraftwerke in ihrer Verfügbarkeit eingeschränkt sein könnten.

Neben dem Ausbau von Photovoltaikanlagen und Windenergie können Anpassungen bei thermoelektrischen Kraftwerken

und Wasserkraftwerken die Anfälligkeit der Energieerzeugung gegenüber einem schwankenden Wasserdargebot senken. Dazu gehören z. B. Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz, der Einsatz alternativer Kühlsysteme und ein Wechsel von Kohle auf Gas mit niedrigerem Kühlungsbedarf (van Vliet et al., 2016). Verringerte Wasserverfügbarkeiten auf der Ebene von Einzugsgebieten und ihr Effekt auf Potenziale zur Energieerzeugung sowie mögliche Nutzungskonflikte sollten in der Energie- und Klimapolitik, in der Raumplanung sowie bei der Planung von Wasserinfrastruktur stärker berücksichtigt werden (z. B. durch Strategien zur Dekarbonisierung des Energiesektors, Resilienzanalysen, klimapolitische Langfriststrategien; WBGU, 2021). Kraftwerke sind auch durch ein Überangebot an Wasser und entsprechende wasserbezogene Extremereignisse gefährdet. Daher sollten Gefährdungen der Energieinfrastruktur durch wasserbezogene Extremereignisse strategisch berücksichtigt und ggf. risikomindernde Maßnahmen ergriffen werden. Maßnahmen für Wasserkraftwerke werden z. B. durch Wasti et al. (2022) dargestellt.

Kalisz et al., 2022; Allison und Mandler, 2018). Beim Abbau von Schiefergas mittels hydraulischer Verfahren (Fracking) ist ebenfalls die Verunreinigung von Grundwasser festgestellt worden (DiGulio und Jackson 2016).

7.4.1.2

Gesundheits- und Umweltrisiken durch Materialgewinnung für die Energiewende

Im Zuge der dringend notwendigen Umstellung des weltweiten Energiesystems auf erneuerbare Energien nehmen die Anzahl und die benötigte Menge der Rohstoffe und Materialien, die für die Herstellung der Energieerzeugungsanlagen und Energiespeicher notwendig sind, stark zu (Watari et al., 2021; WD, 2023). Der wachsende Abbau z. B. von seltenen Erden, Kupfer, Graphit und Lithium für die Herstellung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen, für den Ausbau des Stromnetzes sowie für Lithium-Ionen-Batterien und andere elektrochemische Speicher birgt Risiken für die Wasserqualität (Kap. 2; Kap. 3; Northey et al., 2017; Europäische Kommission, 2020; Bogardi et al., 2021; Raabe, 2023). Bei der Gewinnung von Rohstoffen wie Aluminium-, Kupfer-, Lithium- oder Kobaltverbindungen können Oberflächen- und Grundwasser mit Prozesschemikalien, Metallen und Halbmetallen wie Kobalt oder Arsen verschmutzt werden, die schädlich für die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen sind (Kap. 2; Kap. 3; Madaka et al., 2022; Pesa, 2021; BGR, 2020). In Marokko wurden beispielsweise Arsenkonzentrationen weit über dem Trinkwassergrenzwert der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Flüssen und Quellen festgestellt, deren Wasser zur Pflanzenbewässerung dient. Es wird angenommen, dass der Abbau von Kobalt hierfür verantwortlich ist (Blum et al., 2023). Bei Materialien wie Kupfer, die aus sulfidischen Erzen (Metallsulfide) gewonnen werden, besteht – ähnlich wie beim Kohleabbau – das Risiko der Gewässerverschmutzung durch saures Grubenwasser und die darin gelösten Metallionen (Northey et al., 2017). Diese Risiken müssen berücksichtigt und geeignete Lösungen zum Schutz der Wasserqualität vorausschauend umgesetzt werden. Die Vermeidung von Verschmutzung bei der Materialgewinnung ist wichtig, um nicht intendierte negative Konsequenzen der Energiewende zu vermeiden.

Beispiel: Gesundheits- und Umweltrisiken durch Lithiumgewinnung

Das Leichtmetall Lithium wird hauptsächlich aus Festgestein oder durch wasserintensive Verdunstungstechnologie aus lithiumreicher Sole in Salzseen gewonnen (Halkes et al., 2024). Bei der Lithiumgewinnung können Umwelt- und Gesundheitsrisiken einerseits durch einen – abhängig vom Verfahren – hohen Wasserverbrauch und andererseits durch Beeinträchtigungen der Wasserqualität verursacht werden: Lithium selbst und Nebenprodukte

des Abbaus können eine toxische Wirkung entfalten (Buchert et al., 2020; Bolan et al., 2021). Es konnten zahlreiche negative Effekte höherer Lithiumdosen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und aquatische Systeme festgestellt werden, z. B. negative Auswirkungen auf Gehirnfunktionen sowie Funktionsstörungen und krankhafte Gewebeveränderungen der Schilddrüse (WBGU, 2023; Tanveer et al., 2019; Bolan et al., 2021; Sproule, 2002; Adeel et al., 2023; Chevalier et al., 2024). Lithium entspricht der WHO-Definition eines endokrinen Disruptors, allerdings gibt es bisher keinen Grenzwert für eine gesundheits- und umweltschädliche Lithiumkonzentration im Trinkwasser (Chevalier et al., 2024; Adeel et al., 2023; EPA, 2023; BMJ, 2023; WHO, 2022a). Hierzu besteht dringender Forschungsbedarf.

Es fehlt zudem an einem Verständnis der Interaktion von gelösten Stoffen und Nebenprodukten bei der Gewinnung von Lithiumsalzen. Bei der Gewinnung von Lithiumsalzen aus Festgestein wird das anfallende Abwasser in Absetzbecken geleitet und teilweise wiederverwendet (Schmidt et al., 2023). Bei dieser Gewinnungsmethode stellen die in Absetzbecken gelagerten Reststoffe eine Verschmutzungsquelle für Gewässer dar. Schädliche Stoffe können durch Brüche der Absetzbecken oder durch Versickern in Gewässer gelangen (Buchert et al., 2020). Ein weiteres Risiko bergen Prozessabfälle, die in Flüsse geleitet werden (TPI, 2016). Es bedarf dringend der Entwicklung innovativer und nachhaltiger Aufbereitungstechnologien.

Auch die Gewinnung von Lithiumsalzen durch Verdunstungstechnologien hat Auswirkungen auf Gewässer. Diese Technologien benötigen Frischwasser und werden häufig in ariden Regionen angewendet, beispielsweise im Salzbecken von Atacama (Salar de Atacama) in der chilenischen Wüste (Agusdinata et al., 2018). Bei dieser Technologie verdunsten über 90 % des Wassers der in die Oberflächenbecken gepumpten Sole. Je nach Lagerstätte werden 100–800 m³ Wasser für die Gewinnung einer Tonne Lithiumcarbonat (Li₂CO₃), einem Ausgangsstoff für Lithium-Ionen-Batterien, benötigt (Vera et al., 2023). In weiteren Prozessschritten werden etwa 15–33 m³ Frischwasser pro Tonne Li₂CO₃ und 31–50 m³ Frischwasser pro Tonne Lithiumhydroxid (LiOH), einem weiteren Ausgangsstoff für Lithium-Ionen-Batterien, benötigt. Ein großer Teil des behandelten Wassers wird anschließend wiederverwendet (Kelly et al., 2021; Dellapenna et al., 2013; Schmidt et al., 2023).

Der Eingriff in Salare durch Lithiumsalzgewinnung kann Auswirkungen auf die Wasserstände umliegender Flüsse und anderer Gewässer haben (Vera et al., 2023; Schmidt et al., 2023). Die Details der Zusammenhänge sind Gegenstand aktueller Forschungsprojekte. In der Salar de Atacama sind die Wasserstände der Oberflächen-gewässer bereits gesunken (Vera et al., 2023; Gutiérrez

et al., 2022). Bei der Verdunstungstechnologie werden Prozesschemikalien wie Weichmacher in Becken gesammelt, die bei Versagen von Barrieren in Gewässer gelangen können (Agusdinata et al., 2018).

Unter dem Stichwort Direct Lithium Extraction (DLE) werden alternative Verfahren zur Lithiumsalzgewinnung entwickelt, die keine Verdunstungsbecken benötigen und bei der Lithiumsalzgewinnung effizienter sind. Diese Technologien befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und müssen an die verschiedenen Solevorkommen angepasst werden. Einige Varianten benötigen aber dennoch Frischwasser im Prozess, teilweise sogar mehr als die Verdunstungstechnologie (Vera et al., 2023; Halkes et al., 2024).

Es gibt Hinweise, dass die Technologien der direkten Lithiumextraktion zum Schutz der Wasserqualität mit Technologien zur Wasserwiederverwendung und Rohstoffgewinnung kombiniert werden können (Vera et al., 2023; Kap. 7.4.1.3). Der WBGU empfiehlt zu erforschen, ob und in wieweit eine solche Integration möglich ist. Bei der beschriebenen aktuell verwendeten Verdunstungstechnologie zur Gewinnung von Lithiumsalzen wird derzeit bereits Kaliumchlorid als weiterer Rohstoff gewonnen. Auch bei der direkten Lithiumextraktion könnten Stoffe wie Kalium- und Magnesiumverbindungen potenziell als Begleitprodukte hergestellt werden.

Zur Abschätzung von Potenzialen und Möglichkeiten der Integration bestehender Technologien, die sich aktuell in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstufen befinden, ist weitere Forschung erforderlich (Vera et al., 2023). Ein Beispiel ist der Einsatz von Ionenaustauscherharzen, bei denen das Abwasser je nach Qualitätsanspruch des jeweiligen Prozesses weitergehend behandelt und wiederverwendet werden kann (VCI, 2017).

Die Behandlung von Abwasser zur Gewinnung der darin enthaltenen Metallionen und Mineralien ist ein Mehrgewinn im Sinne eines klimaresilienten Wassermanagements (Kap. 6.1.2), wenn sie als Sekundärrohstoffe wiederverwendet und unter Vermeidung von Sekundärverschmutzungen extrahiert werden.

7.4.1.3

Recycling von lithiumbasierten Batterien

Werden Lithium-Ionen-Batterien am Ende ihres Lebenszyklus nicht recycelt, sondern unsachgemäß entsorgt, besteht das Risiko, dass Schadstoffe in den Boden und in Gewässer gelangen. Erhöhte Lithiumkonzentrationen in Trinkwasser und Flüssen in Folge menschlicher Aktivitäten, u. a. aus Lithium-Ionen-Batterien, wurden etwa in Seoul bereits nachgewiesen (Choi et al., 2019). Das Recycling der Batterien ist prinzipiell möglich, allerdings entsprechen die vorhandenen industriellen Recyclingkapazitäten bei weitem nicht dem prognostizierten Aufkommen an Batterien (Neef et al., 2021).

Um Wasserverschmutzung zu vermeiden und den Bedarf an Primärrohstoffen zu senken, stehen unterschiedliche Recycling-Verfahren zur Verfügung (Nijnens et al., 2023). Für alle Verfahren wird Wasser benötigt, wenn auch in unterschiedlichem Umfang (Fahimi et al., 2022). Da Verfahren mit vergleichsweise geringem Wasserverbrauch andere unerwünschte Effekte haben können, sollten bei der Errichtung einer Recyclinganlage mögliche Vor- und Nachteile im Hinblick auf den lokalen Wasserhaushalt sowie mögliche weitere, nicht intendierte Effekte geprüft und abgewogen werden (Wagner-Wenz, et al. 2023; Bai et al., 2020). Dabei sollte auch berücksichtigt werden, dass Recycling den nötigen Abbau von Primärrohstoffen und dessen mögliche negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verringert (Kap. 7.4.2).

Auf Grund des hohen Wasserbedarfs beim Batterienrecycling ist die weitergehende Abwasserbehandlung mit dem Ziel der Wiederverwendung von Rohstoffen sinnvoll, denn diese Abwässer enthalten einen verwertbaren Anteil an Lithium sowie weiteren Metallen und können durch die Behandlung gegebenenfalls wieder verwendet werden. Die mit der Einleitung von Abwässern verbundene Gewässerverschmutzung und der Wasserverbrauch würden reduziert. Entsprechende industrielle Verfahren sind in der Entwicklung und müssten auf die Gewinnung von Lithium beim Batterienrecycling angepasst werden.

7.4.2

Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser

Eine Möglichkeit zum Schutz der Wasserqualität und zur Umsetzung des Zero-Pollution-Leitbilds ist die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Lithium aus Abwässern (Abb. 7.4-2). Abwasser als wertvolle Ressource kann in mehrfacher Hinsicht zur Schließung von Lücken in der Kreislaufwirtschaft genutzt werden und zu Mehrgewinnen führen (Kap. 6.1): Zum einen sollte Abwasser je nach angestrebtem Verwendungszweck, etwa zur Bewässerung in der Landwirtschaft, und abhängig von der benötigten und gegebenen Qualität weitergehend behandelt und wiederverwendet werden. Zum anderen kann bei der Abwasserbehandlung durch Biogaserzeugung aus Klärschlamm Energie zurückgewonnen werden, was im Kontext der in der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie angestrebten Energieneutralität kommunaler Kläranlagen bedeutsam ist (Kap. 7.1.2).

Darüber hinaus ist Abwasser ein Träger für Stoffe, die teilweise als schädlich gelten, aber auch als wertvolle Sekundärrohstoffe wie z. B. Biopolymere, Lithium oder Kupfer gewonnen werden können (DuChanois et al., 2023; Schambeck et al., 2020; Paul et al., 2021). Wie bereits für Phosphor in der Klärschlammverordnung in Deutschland vorgeschrieben, könnten auch diese Stoffe

Kasten 7.4-2**Wasserbedarf des Energiesektors und Auswirkungen des Klimawandels**

Der Wasserverbrauch verschiedener Kraftwerke zur Strom- und Wärmebereitstellung ergibt sich über ihren gesamten Lebenszyklus. Dazu gehören der direkte Wasserverbrauch für den Betrieb der Kraftwerke und der indirekte Verbrauch für deren Errichtung, die Herstellung der notwendigen Materialien sowie die Bereitstellung von Brennstoffen. Der Verbrauch hängt stark vom Standort und dem dort herrschenden Klima, dem Kraftwerkstyp, der Kühlmethode, dem eingesetzten Brennstoff, der Materialherstellung und weiteren Faktoren ab (Jin et al., 2019b; Mekonnen et al., 2015; Meldrum et al., 2013; Flörke et al., 2021).

Ein Vergleich einzelner Studien wird durch unterschiedliche Methoden zur Erhebung des Wasserbedarfs und die zu Grunde gelegten Systemgrenzen erschwert. Das heißt, Studien unterscheiden sich darin, wie und in welchem Umfang Wasserbedarf etwa für die Herstellung von Materialien und den Bau von Kraftwerksanlagen oder die Förderung und den Transport von Brennstoffen einbezogen wurden (Jin et al., 2019b; Pfister et al., 2017).

Gemeinsam haben die hier ausgewerteten Studien, dass sie den Verbrauch blauen Wassers erfassen, die Verschmutzung von Abwässern jedoch nicht berücksichtigen. Hinzu kommt, dass nicht alle Weltregionen gleichmäßig in Studien repräsentiert sind (Jin et al., 2019a, b).

Wasserbedarfe nach Technologie

Zwischen den Wasserbedarfen verschiedener Kraftwerkstechnologien liegen zum Teil mehrere Größenordnungen (Faktor zehn oder höhere Zehnerpotenzen), so dass sich trotz der genannten Unterschiede und Unsicherheiten qualitativ robuste Muster erkennen lassen – hier auf Basis der Meta-Analyse von Jin et al. (2019b), die mit den oben zitierten Studien konsistent ist (Abb. 7.4-1):

- Der auf die erzeugten Strom- und Wärmemengen bezogene Wasserverbrauch über den gesamten Lebenszyklus für Öl-, Kern- und Kohlekraftwerke ist eine bzw. zwei Größenordnungen höher als für Photovoltaik (PV) bzw. Windkraft; konzentrierende Solarthermie, Geothermie und Erdgaskraftwerke liegen dazwischen.
- Der Wasserbedarf von Speicherwasserkraftwerken kann durch hohe Verdunstung aus Reservoiren deutlich höher sein als bei Öl-, Kohle- und Kernkraftwerken. Dies hängt maßgeblich vom lokalen Klima und der Topographie ab, welche die Oberflächenvergrößerung beim Aufstauen bestimmt (Jin et al., 2019b; Mekonnen et al., 2015). Für ein Wasserkraftwerk mit Reservoir in Norwegen (Trollheim) wurde beispielsweise eine besonders niedrige Verdunstungsrate ermittelt (Bakken et al., 2016).
- Der Wasserbedarf von Bioenergie kann nochmals eine Größenordnung über dem Verbrauch von Wasserkraftwerken liegen. Die Größe des Unterschieds hängt davon ab, wie stark im Biomasseanbau bewässert wird und, falls beim Nahrungsmittelanbau energetisch verwertbare Reststoffe anfallen, welcher Anteil des Wasserverbrauchs den Reststoffen und welcher der Nahrungsmittelproduktion zugerechnet wird (Jin et al., 2019b; Mathioudakis et al., 2017).
- Bei Windkraft und PV entfällt der größte Teil des Wasserbedarfs auf die Herstellung und Reinigung der Anlagen.
- Bei Kernkraftwerken und fossilen Kraftwerken dominieren die Bedarfe für Kühlung während des Betriebs, bei Bio-

energiekraftwerken die Bewässerung bei der Brennstoffherstellung. Der operative Wasserverbrauch thermischer Kraftwerke mit Kohlenstoffabscheidung (CCS) ist um 30 % bis 80 % höher als bei solchen ohne CCS.

- Je nach verwendeter Kühlmethode kann die Wasserentnahme (in Abb. 7.4-1 nicht gezeigt) deutlich höher sein als der tatsächliche Wasserverbrauch, bei Kernkraft bis zu einer Größenordnung.

Der Gesamtwasserverbrauch des Energiesektors ergibt sich demnach auch aus der Zusammensetzung nach Kraftwerksarten. Daher kann eine Umgestaltung des Energiesektors zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu einem höheren oder niedrigeren Gesamtwasserbedarf führen, je nach Anteil der eingesetzten Technologien. Dies sollte beim Design von Szenarien und Strategien für den Strom- und Wärmesektor stärker berücksichtigt werden (Lohrmann et al., 2023; Flörke et al., 2021; Mekonnen et al., 2016; Payne et al., 2024).

Windenergie und PV können Wasserverbrauch senken

Eine wachsende Stromerzeugung aus Wasserkraft und Bioenergie aus Holz oder Anbaubiomasse können den Gesamtwasserverbrauch für die Strom- und Wärmeerzeugung stark erhöhen (z. B. Mekonnen et al., 2016). Der Einsatz von Windenergie und PV senkt den regionalen Wasserverbrauch gegenüber fossilen Kraftwerken oder Kernkraftwerken und kann dazu beitragen, lokale Wasserkrisen zu entschärfen oder zu vermeiden. Die Installation von PV-Modulen über Kanälen und schwimmend auf den Reservoiren von Wasserkraftwerken kann Mehrgewinne erzeugen. Die Module verringern die Verdunstung und werden durch die verbleibende Verdunstung gekühlt und dadurch effizienter. Gleichzeitig verringert sich der Flächenbedarf für PV an Land (Jin et al., 2023). Zudem können sie das Wachstum von schädlichen Algenblüten verringern (Kap. 3.1.3.2). Das Stromerzeugungspotenzial von schwimmenden PV-Modulen ist hoch. Auf nur 10 % der Reservoirfläche aller Wasserkraftwerke weltweit könnten PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung installiert werden, die der Leistung aller fossilen Kraftwerke entspricht (Almeida et al., 2022). Allerdings gibt es auch ökologische Risiken, potenzielle Nutzungskonflikte und technische Fragen, die abgewogen bzw. gelöst werden müssen (Jin et al., 2023; Almeida et al., 2022).

Stromerzeugung aus Wasserkraft spielt bereits in vielen Teilen der Welt, vor allem in China, Südamerika und Afrika, eine große Rolle (Ritchie et al., 2023). Vor allem in Asien ist ein starker Zubau geplant oder bereits im Gange, große unerschlossene technische Potenziale für Wasserkraft gibt es vor allem in Afrika. Wie auch bei Bioenergie ist jedoch neben einer klima- und energiepolitischen Betrachtung eine ökologische, soziale und politische Gesamtbetrachtung essenziell. So kann vermieden werden, dass beispielsweise die Stromversorgung von Industrie und urbanen Zentren oder Maßnahmen zum Klimaschutz mit Flächenverbrauch und der massiven Störung lokaler Wasserhaushalte zu Lasten von Ökosystemen und der Bevölkerung einher gehen.

Weiterhin ergibt sich eine Veränderung räumlicher Muster der Wasserbedarfe, wodurch lokale Wasserverfügbarkeiten entscheidend werden: PV und Windkraft benötigen am Ort der Stromerzeugung sehr viel weniger Wasser als thermische Kraftwerke. Der Wasserbedarf für die Material- und Anlagenherstellung von Windrädern und Solarmodulen entsteht zudem an anderen Orten als derjenige für Abbau, Aufbereitung und Transport fossiler und nuklearer Brennstoffe.



Wert von Wasser für andere Nutzungen und Ökosysteme stärker berücksichtigen

Zukünftige Veränderungen des Wasserdargebots schaffen Herausforderungen für die Stromerzeugung und verschärfen unter Umständen Nutzungskonflikte. Gleichzeitig werden z. B. die Funktionen von Wasserspeichern jenseits der Stromerzeugung, durch die sie häufig finanziert werden, wertvoller. Sie können dem Rückhalt von Hochwässern, der Trinkwasserversorgung, als Puffer für Bewässerung, der industriellen Nutzung und dem Erhalt von Ökosystemen, u. a. durch die Sicherung von Mindestabflüssen bei gleichzeitig begrenzten Maximalabflüssen sowie Rückhaltefunktion bei starken Niederschlägen, dienen.

Planung, Auslegung, Investitionen und Betrieb von Kraftwerken werden allerdings bisher von energiewirtschaftlichen Aspekten dominiert. Wasserwirtschaftliche Anreize, etwa um ihre Funktion als Wasserspeicher für Trockenperioden zu berücksichtigen, sind schwach ausgeprägt. Bestehende wasserwirtschaftliche Auflagen und Regulierungen vermitteln Kraftwerksplanern bzw. -betreibern in der Regel keine zeitlich aufgelösten Informationen und Anreize zu Knappheiten, anderen Bedarfen und alternativen Nutzungen (Opportunitätskosten), den Wert der Rückhaltefunktion zur Hochwasservermeidung usw. Die Auslegung und Befüllung von (Kraftwerks-)Wasserspeichern vernachlässigen häufig die zunehmende Unsicherheit von Niederschlägen sowie in alpinen Regionen das Verschwinden von Basisabflüssen von Gletschern und Permafrostböden.

Wasser bei Planung stärker berücksichtigen

Die stärker schwankende Verfügbarkeit und der Wert von Wasser sollten zukünftig in Regulierungen sowie bei (bisher oft energiewirtschaftlich dominierten) Investitions- und Betriebsentscheidungen für Kraftwerke stärker berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit dafür sind zeitlich aufgelöste Preissignale, also zeitabhängige Vergütungen der Reservoirbetreiber für die sichere Bereitstellung von Wasser aus Speichern bzw. zeitabhängige Wasserpreise für die Betreiber thermischer Kraftwerke, die Kühlwasser entnehmen wollen. Dadurch würde sichergestellt, dass z. B. bei Investitionen in und dem Betrieb von Dämmen deren Multifunktionalität besser berücksichtigt wird, dass die Externalitäten des Wasserverbrauchs thermischer Kraftwerke sich vollständig in deren Stromgestehungskosten widerspiegeln und dass Nutzungskonflikte durch Wasserstoffanlagen besser berücksichtigt werden. Schon bei der Planung und Zulassung von Wasserkraftwerken sollten wasserwirtschaftliche Auswirkungen ermittelt werden, zur Entlastung der Zulassungsbehörden ggf. als Pflicht des Antragstellers, und in eine Kosten-Nutzen-Analyse einfließen (Kap. 6.1.3).

Stromerzeugungstechnologien mit hohem Wasserbedarf, wie thermoelektrische und Wasserkraftwerke, sollten vor allem dann eingesetzt werden, wenn kaum eine Substitution durch andere Erzeugungs-, Speicher- und Übertragungstechnologien möglich ist (z. B. zur Systemstabilisierung) oder ein hoher Zusatznutzen durch eine gleichmäßigere Wasserverfügbarkeit oder Hochwasserschutz zu erwarten ist (der nicht durch naturnahe Maßnahmen erreichbar ist).

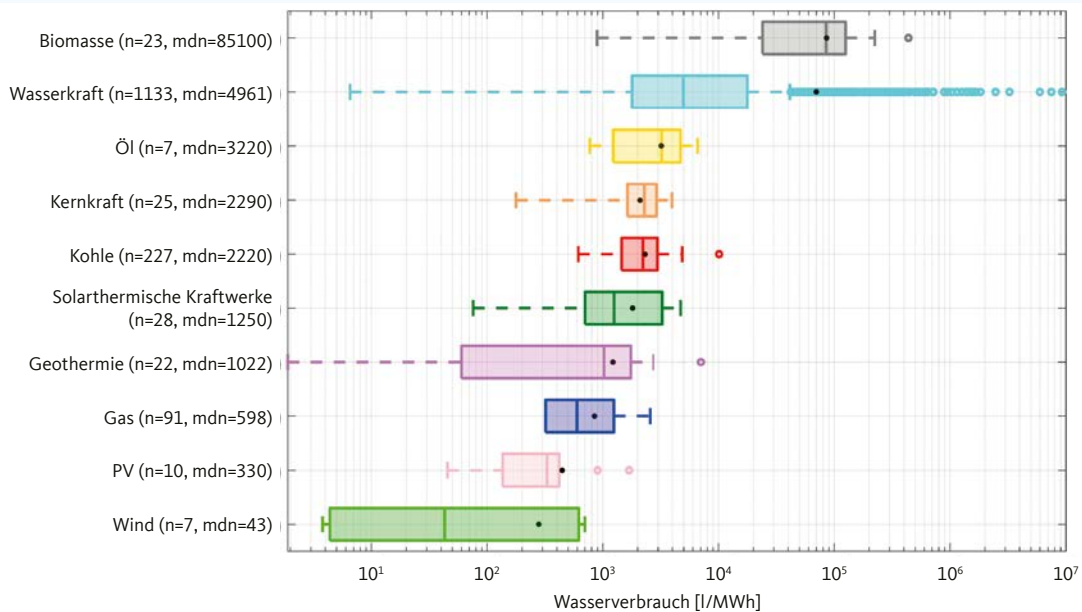


Abbildung 7.4-1

Verbrauch blauen Wassers durch verschiedene Kraftwerkstypen über ihren Lebenszyklus. Der Verbrauch grünen Wassers beim Anbau von Biomasse ist nicht enthalten. n: Zahl der Datenpunkte, die aus verschiedenen Studien entnommen wurden. Sie repräsentieren jeweils spezifische technische Ausprägungen, lokale Umweltbedingungen und methodische Detailannahmen. mdn: Medianwert des Wasserverbrauchs der jeweiligen Technologie. Punkte bezeichnen den jeweiligen Durchschnittswert, Kreise bezeichnen Ausreißer.

Quelle: Jin et al., 2019b

im Zuge der Abwasserbehandlung zurückgewonnen werden (Kap. 7.1.2). Auch die Nationale Wasserstrategie greift die Rückgewinnung von Wertstoffen in ihrer Vision für Wasser-, Energie- und Stoffkreisläufe auf und strebt die dazu notwendige Sektorenkopplung an (BMUV, 2023b). In Abb. 7.4-2 ist der Zusammenhang zwischen dem Rohstoffbedarf für die Energiewende, der Gewinnung von Sekundärrohstoffen und der Wasserwiederverwendung dargestellt. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der technischen Machbarkeit sind jedoch nicht alle Abwässer gleichermaßen zur Rückgewinnung geeignet. Für organische Stoffe eignet sich eher Kommunalabwasser, für Metalle eher Industrieabwasser (Dutta et al., 2021; DuChanois et al., 2023).

Beispielsweise ist Kommunalabwasser eine Quelle für Polyhydroxyalkanoate, die als biologisch abbaubare Biopolymere fossil erzeugte Polymere ersetzen können. Auch Cellulose kann aus Abwasser wiedergewonnen werden und als Bindemittel in Baumaterial oder in der Papierproduktion verwendet werden (Dutta et al., 2021; Schambeck et al., 2020; Paul et al., 2021). Nennenswerte Konzentrationen an Metallionen befinden sich in Industrieabwässern, etwa aus der Batterieproduktion, und in den Abwässern des Bergbaus. Im Bergbau werden aus dem Erz ausgewaschene, nicht extrahierbare Metalle als Abfall in Absetzbecken gesammelt. Für die Rückgewinnung der Metallionen aus Industrieabwässern sind zunächst lohnenswerte Metalle zu identifizieren. Diese

sind im Allgemeinen kritische Materialien wie seltene Erden, bei denen das Risiko für den Ausfall der Versorgung der Industrie hoch ist, die aber unter anderem für die Energiewende essenziell sind. Weitere Kriterien zur Bewertung sind geringe Recyclingraten aus Produkten, hohe Energiekosten bei der Rohstoffproduktion und seltenes geologisches Vorkommen. Die Erschließung neuer Abbaugelände für die gewonnenen Stoffe könnte reduziert, die Volumina der Absetzbecken in den Minen verkleinert und die Verschmutzung umliegender Gewässer reduziert werden (Kap. 2; Kap. 3; Dutta et al., 2021; DuChanois et al., 2023).

Die derzeitigen Technologien für die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser (Dutta et al., 2021; DuChanois et al., 2023) sind häufig sehr energieintensiv und müssen in einen bereits existierenden Prozess integriert werden. Finanziell gesehen ist es sinnvoll, wenn die Kosten zur Rückgewinnung den aktuellen Marktpreis des Rohstoffs nicht überschreiten. Dabei kann auch die Energierückgewinnung aus den Prozessen zur Abwasserbehandlung als finanzielle Unterstützung zur Implementierung der Rückgewinnungstechnologien helfen (EEA, 2022). Vielversprechend als günstige, energieeffiziente und umweltfreundliche Technologien sind Methoden wie Biosorption und Bioleaching, bei denen z. B. Bakterien zur Metallgewinnung eingesetzt werden (Adeeyo et al., 2023; Dutta et al., 2021).



Abbildung 7.4-2

Rohstoffrückgewinnung aus Industrieabwässern. Die Rückgewinnung von Rohstoffen bei der Produktion von Gütern senkt den Bedarf an Primärrohstoffen im Produktionsprozess und ermöglicht eine Verringerung der Gesamtkosten durch Rohstoffverkauf. Da bestimmte Rohstoffe abhängig von ihrer Konzentration toxisch wirken können, kann Rohstoffrückgewinnung die Abwasserqualität verbessern. Je nach erreichtem Qualitätsstandard kann das Abwasser im Produktionsprozess wiederverwendet, der Behandlung in Kläranlagen zugeführt oder direkt in Fließgewässer eingeleitet werden. Quelle: WBGU

7.5 Handlungsempfehlungen

7.5.1 EU-Kommunalabwasserrichtlinie zielgerichtet umsetzen

Erweiterte Herstellerverantwortung ausweiten und anreizkompatibel gestalten

Die 2024 vom EU-Parlament verabschiedete novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie sieht für den Ausbau und Betrieb einer weitergehenden Abwasserreinigungsstufe in Kläranlagen eine Finanzierung von mindestens 80 % der Investitions- und Betriebskosten durch die Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetikprodukten vor. Aus Sicht des WBGU sollte geprüft werden, inwieweit eine Ausweitung der erweiterten Herstellerverantwortung für weitere Schadstoffgruppen, wie toxische und persistente Haushaltschemikalien sowie Pestizide, und Stoffeigenschaften, wie Persistenz in der aquatischen Umwelt, möglich ist. So könnten alle Hersteller wasserunreinigender Produkte an den Kosten für die Bewahrung der Wasserqualität beteiligt werden (UBA, 2023a: 8). Dabei sollte die Gestaltung anreizkompatibel sein: Unternehmen sollten in Abhängigkeit der Umweltgefährdung der von ihnen in Umlauf gebrachten Stoffe und Produkte zur Verantwortung gezogen werden. Dies würde niedrigere Beteiligungen an den Kosten oder sogar Ausnahmen für Unternehmen bedeuten, die umweltverträgliche, gut abbaubare Stoffe einsetzen. Unternehmen, die stark gefährdende Stoffe in Verkehr bringen, würden stärker beteiligt. In Art. 9 der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist eine Staffelung der Beteiligung von Unternehmen nach Umweltgefährdung der in Verkehr gebrachten Stoffe explizit angedacht. Auch soll es der Richtlinie zufolge Ausnahmen für Produkte geben, die Substanzen enthalten, die nachweislich rasch abbaubar sind oder am Ende ihrer Lebenszeit keine organischen Spurenstoffe hinterlassen. Bei der Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie sind diese Punkte für die Setzung von Anreizen zur Reduktion der Emission umweltgefährdender Stoffe entscheidend.

7.5.2 Diffuse Einträge aus Land- und Forstwirtschaft verringern

Einführung einer Pestizidsteuer

Integrierter Boden- und Gewässerschutz ließe sich über eine Pestizidabgabe, etwa in Form einer Steuer, umsetzen. In Dänemark wird eine Pestizidsteuer bereits mengen- und risikobasiert erhoben, was die Belastung der Böden und Gewässer vermindert hat (Nielsen et al., 2023). Das der Steuer zu Grunde liegende Prinzip „je schädlicher ein Pestizid für Mensch und Umwelt, desto höher die Abgaben“ wäre ein Baustein, um das in der Farm-to-Fork-Strategie der EU enthaltene Ziel der Reduzierung des Pestizideinsatzes in der EU um 50 % bis 2030 zu erreichen.

Strengeres Monitoring von Einträgen von Stickstoff, Phosphor und Pestiziden

Der WBGU empfiehlt das mit der Düngeverordnung (DüV) verbundene, nationale Monitoring-Programm für Stickstoff und Phosphor auch auf andere Stoffe wie Pestizide und Abbauprodukte auszuweiten. Das Ziel eines solchen flächendeckenden Monitorings sollte neben der Verminderung des Nitratgehalts im Grundwasser auch der Schutz der Biodiversität vor Eutrophierung und Pestiziden sein.

Neben der EU-Zielsetzung der Reduzierung des Pestizideinsatzes um 50 % können Monitoring und wirksames Gegensteuern mit restriktiven Maßnahmen bei Überschreitung der regulatorisch akzeptablen Konzentration eines Pestizids die Gewässerqualität auf lokaler Ebene deutlich erhöhen. Ähnlich der Ermittlung von Nitratquellen braucht es dazu ein engmaschiges Netz an Monitoringstationen.

Entwicklung biologischer Alternativen zum Pflanzenschutz

Die Abkehr von chemischen Pestiziden könnte durch die Entwicklung biologischer Wirkstoffe, z. B. mikrobieller, botanischer oder biochemischer Pestizide, sowie den Einsatz natürlicher Fressfeinde und landwirtschaftlich einsetzbarer Antibiotika vorangetrieben werden (Ayilara et al., 2023; Seenivasagan und Babalola, 2021; Tomar et al., 2024). Auch diese Alternativen sollten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und möglicher negativer Auswirkungen auf Mensch und Natur vorab untersucht werden. Aus den genannten Ansätzen könnten naturbasierte Lösungen entwickelt werden, die für Landwirt:innen eine Zukunftsperspektive und für kleinere Hersteller Entwicklungs- und Marktchancen bieten könnten. Entsprechende Projekte könnten über die Forschungslinie „Bioökonomie“ des BMBF gefördert werden.

Exportverbot für in der EU verbotene Pestizide

Chemiekonzerne in der EU exportieren nach wie vor Pestizide, die in der EU selbst bereits nicht mehr in Verkehr gebracht werden dürfen, in Länder mit weniger strengen Anforderungen an deren Zulassung und Ausbringung (Sarkar et al., 2021; Kasten 7.5-1). Der WBGU empfiehlt daher eine beschleunigte Umsetzung des bereits ausgearbeiteten Exportverbots von in der EU nicht mehr zugelassenen Pestiziden. Ein Verbot ist nicht nur zur Schadstoffreduktion in Wasserkreisläufen notwendig, sondern auch moralisch geboten. Den Anwender:innen der Pestizide steht in einkommensschwächeren Ländern meist keine ausreichende Arbeitsschutzkleidung und maschinelle Technik zur Verfügung, um sich bei Ausbringung vor den gesundheitlichen Gefahren der Mittel zu schützen (Boedeker et al., 2020). Außerdem können persistente Pestizide als Rückstände in Lebensmitteln zurück in die EU gelangen (EFSA et al., 2024). Die Bundesregierung sollte sich für eine EU-weite Vereinheitlichung des Exportverbots sowie für die Abschaffung und Vermeidung von Doppelstandards einsetzen. Das Exportverbot in Frankreich kann als Vorbild dienen. Es ist seit dem 1. Januar 2022 in Kraft und verbietet neben dem Export auch die Herstellung und Lagerung von in der EU nicht mehr zugelassenen Pestiziden.

Einheitliche Pestizidstandards erarbeiten

Der WBGU empfiehlt multilaterale Prozesse zur Erarbeitung einheitlicher Pestizidstandards. Gleichzeitig sollten in die EU keine landwirtschaftlichen Produkte aus Regionen importiert werden, in denen Pestizide zum Einsatz kommen, die in der EU als nachweislich umweltschädlich eingestuft sind. Eine Verschärfung der Importbegrenzung müsste durch über Entwicklungszusammenarbeit finanzierte Projekte zur Unterstützung von Transformationsprozessen in den betroffenen Produktionssystemen begleitet werden, insbesondere wenn sie in Ländern mit niedrigem Einkommen liegen. Zudem muss Konformität mit Welthandelsrecht sichergestellt sein.

Illegalen Handel mit Pestiziden unterbinden

Um den illegalen Handel mit Pestiziden und chemischen Düngemitteln einzudämmen, sollte internationale Zusammenarbeit auch zur Stärkung grenzüberschreitender Kooperation in diesem Bereich in Afrika, Lateinamerika und Asien beitragen. Deutschland und die EU sollten außerdem die Bestrebungen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) gegen den illegalen Handel mit Pestiziden stärker unterstützen (OECD, 2024).

Stockholmer Übereinkommen ausweiten

Eine Ausweitung des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe auf krebserregende und hormonell wirksame Substanzen (endokrine Disruptoren) sollte politisch angestrebt werden, um deren Produktion und Freisetzung in die Umwelt zu unterbinden (WBGU, 2020).

Pestizideinsatz und Wasserverbrauch in der Landwirtschaft verringern

Die Verringerung des Einsatzes von importierten Pestiziden und Düngemitteln dient in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen zum einen dem Wasser- und Gesundheitsschutz und zum anderen der finanziellen Unabhängigkeit von Importen. Der WBGU unterstützt daher die Bemühungen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), gemeinsam mit afrikanischen Partnern eine standortangepasste, nachhaltige und ökonomisch tragfähige Landwirtschaft in Afrika zu entwickeln, auch durch die Förderung von entsprechender Forschung. Ziel ist eine Steigerung der Erträge bei gleichzeitiger Minimierung des Wasserverbrauchs und der Nährstoffeinträge. Auch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) unterstützt über entsprechende Programme die Entwicklung einer nachhaltigen Agrar- und Ernährungswirtschaft, z. B. in der ASEAN-Region. Derartige Programme sollten ausgeweitet werden, u. a. mit zusätzlichem Fokus auf dem

Kasten 7.5-1

Beispiel: Das Pestizid Chlorpyrifos

Ein Beispiel für den Export eines in der EU verbotenen Pestizids ist Chlorpyrifos. Bis vor wenigen Jahren war Chlorpyrifos auch in Deutschland zugelassen, obwohl bekannt war, dass die Chemikalie neurotoxische Eigenschaften besitzt. Sie wirkt besonders schädlich auf Wasserlebewesen wie Amphibien. Erst nachdem die Europäische Agentur für Lebensmittelsicherheit Rückstände von Chlorpyrifos auf Grund der neurotoxischen Wirkung als Gefahr für die Entwicklung von Kindern schon vor der Geburt einstufte und Deutschland sowie andere EU-

Staaten das Pestizid bereits verboten hatten, wurde die Zulassung 2020 auch EU-weit nicht verlängert. Für die neurotoxische Wirkung gab es bereits 1998 erste Hinweise (Mie et al., 2018). Obwohl deutsche Behörden heute eine Aufnahme der Chemikalie in das Stockholmer Übereinkommen vorbereiten, wird Chlorpyrifos weiterhin aus der EU in Drittländer exportiert. Deshalb können weiterhin Rückstände auf in die EU importierten Zitrusfrüchten, Tomaten und Oliven nachgewiesen werden, die gesundheitliche Gefahren für die Konsument:innen mit sich bringen. Vor allem sind jedoch die (aquatischen) Ökosysteme und die menschliche Gesundheit in den Anbaugebieten gefährdet (EFSA et al., 2024).

Wasserschutz sowie der Begrenzung und Optimierung des Dünger- und Pestizideinsatzes. Standortangepasste Maßnahmen sind dabei oft nur mit dem Wissen traditioneller Landwirtschaft umsetzbar (WBGU, 2020). Indigene Praktiken sind auf den Erhalt der Fertilität fragiler Böden ausgelegt, wie etwa die Erhöhung der Humusbildung durch afrikanische Schwarzerde, und schützen sowohl grünes als auch blaues Wasser (Solomon et al., 2016).

7.5.3

Wasserverschmutzung durch Pharmazeutika eindämmen

Einschränkung von Reserveantibiotika in der Tiermast

Der Einsatz von Reserveantibiotika sollte nur noch unter behördlicher Genehmigung erfolgen. Laut Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) wurden Reserveantibiotika im Jahr 2022 in 41 % der Fälle bei Masthühnern in Deutschland eingesetzt (BfR, 2023).

Tierwohl zur Verbesserung der Wasserqualität fördern

Ein wirksamer Hebel zur Verbesserung der Wasserqualität, der z. B. im Rahmen eines One-Health-Ansatzes durch die Politik genutzt werden kann, ist die Reduktion der Nutztierhaltung und höhere Priorisierung des Tierwohls – verbunden mit einem geringeren Einsatz von Antibiotika. Auch tierethische Gründe spielen hierbei eine Rolle. Dies würde auch dem Schutz der menschlichen Gesundheit dienen, denn die Entwicklung antimikrobieller Resistenzen wirkungsvoll zu unterbinden und die Wirksamkeit von Reserveantibiotika zu erhalten ist erforderlich, um das Recht auf körperliche Unversehrtheit sicherzustellen. Hierbei ist dringender Handlungsbedarf geboten. Zur Verbesserung des Tierwohls stehen dem Staat auch weitergehende Maßnahmen zur Verfügung als in der Deutschen Antibiotika-Resistenzstrategie DART 2030 beschlossen. Die Umsetzung der Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung zur Reduktion des Fleischkonsums sollte verstärkt unterstützt werden (DGE, 2024).

Beschränkung des Einsatzes von Tierarzneimitteln

Der Einsatz von Tierarzneimitteln, die ausschließlich der Ertragssteigerung in der Tierhaltung dienen, wie bei der hormongesteuerten Reproduktion (Kap. 3.3.2.1), ist gesetzlich zu unterbinden. Hier gilt es, sowohl das Tierwohl zu schützen, als auch im Sinne des Zero-Pollution-Ansatzes Einträge von tiermedizinischen Präparaten und Hormonen in Böden und Gewässer in der EU und, über entsprechende Lieferkettengesetze, im Nicht-EU-Ausland zu vermeiden.

7.5.4.

Den Einsatz moderner Testverfahren fördern

Engmaschigere Überwachung mittels Hochdurchsatz-Screening-Methoden

Der Einsatz moderner (bio-)analytischer Methoden sollte in der bisherigen Überwachung von Trinkwasser, Kläranlagenabläufen und Fließgewässern ausgeweitet werden sowie in einem erweiterten Überwachungsnetzwerk in landwirtschaftlichen Flächen erfolgen. Methoden und Verfahren zum Schutz der Wasserqualität sollten über entsprechende Forschungslinien vorangetrieben werden. Modernes Umweltmonitoring und humanes Biomonitoring unter Verwendung von neuartigen und kostengünstigen Non-Target-Screening-Verfahren und in-vitro-Verfahren erlauben es, Frühwarnsysteme zu etablieren und durch Hochdurchsatz-Analytik räumlich und zeitlich engmaschig miteinander zu verknüpfen (Escher et al., 2021; González-Gaya et al., 2021; Paszkiewicz et al., 2022).

Konsequente Verzahnung von Tests, Zulassung und Monitoring

Im Sinne des Zero-Pollution-Ansatzes sollte das Ziel sein, ein engmaschiges Netz zur Zulassung und Kontrolle von Stoffen zum Schutz der Gesundheit von Menschen und Ökosystemen zu etablieren. Bereits bei der Entwicklung neuer Stoffe sollten über KI-Modelle mögliche negative Effekte auf Menschen und Umwelt erkannt und vermieden werden. Viele New Approach Methodologies (Samelbegriff für ein breites Spektrum tierversuchsfreier Ansätze und Methoden, z. B. in-vitro- und in-silico-Verfahren) lassen sich kostengünstig etablieren, standardisieren und in Verfahren zu Stoffzulassung einbringen. Ergebnisse mit Relevanz für Menschen und Umwelt sollten dokumentationspflichtig werden. Werden problematische Substanzen identifiziert, sollten diese Informationen automatisch an die für die Stoffzulassung zuständigen Behörden weitergeleitet werden, die daraufhin mögliche Verbote und Einschränkungen prüfen. Die neuen Verfahren versprechen bei geschickter Umsetzung und Verzahnung von Zulassung und Überwachung besseren Gewässerschutz durch Prävention und engmaschigeres Umweltmonitoring, bei gleichzeitig geringeren Kosten für Unternehmen und Überwachungsbehörden. Die Etablierung einheitlicher Standards mit kostengünstigen Verfahren fördert außerdem den Wettbewerb zertifizierter Prüfinstitute im Dienstleistungssektor.

7.5.5

Nutzung alternativer Abwasserentsorgungskonzepte fördern

Förderung des Einsatzes innovativer Abwassersysteme

Die Bundesregierung sollte in der Entwicklungszusammenarbeit im Bereich Wasserqualität, Sanitärversorgung und Hygiene (WASH) bevorzugt Projekte fördern, die über den Bau von leitungsgebundenen Abwassersystemen hinausgehen und die gesamte Abwasser-Dienstleistungskette in den Blick nehmen (Kap. 7.3.2). Aus technologischer Sicht bedeutet dies, hygienische, dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme mit Fäkalschlamm-Management als gleichwertige Lösung neben zentralen Abwassersystemen zu betrachten. Es sollte insbesondere die Verbesserung und Formalisierung informeller, bereits bestehender dezentraler, nicht leitungsgebundener Abwassersysteme fokussiert werden. Dabei muss auch eine Analyse des Fäkalschlamm-anfalls, der Transportwege und -kosten sowie der Entsorgungs- oder Wiederverwendungspfade erfolgen, um einer Fehldimensionierung der Klärtanks und Fäkalschlamm-Behandlungsanlagen vorzubeugen.

Integration dezentraler Abwassersysteme in Ausbildung und Praxis

Damit hygienische dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme eine gleichwertige Option neben konventionellen, zentralen Abwassersystemen werden können, muss die Ausbildung von Ingenieur:innen und technischen Fachkräften angepasst werden. Aktuell beinhalten die Curricula nahezu ausschließlich Planung, Bau und Betrieb von zentralen Abwassersystemen. Auch Planungsbüros fokussieren meist auf konventionelle Lösungen, ohne ausreichend zu prüfen, ob diese standortgerecht sind. Oft wird nicht untersucht, ob der Aufwand für Betrieb und Instandhaltung geleistet werden kann oder ob weniger wohlhabende Bevölkerungsgruppen in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen erreicht werden (Gambrill et al., 2020). Auch dort müssen Kompetenzen und Kapazitäten für die Planung von hygienischen, dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersystemen aufgebaut werden.

Übernahme von Leadership durch nationale Regierungen

Eine Priorisierung von Wasserqualität, Sanitärversorgung und Hygiene (WASH) in der politischen Agenda und die Übernahme von Leadership durch nationale Regierungen kann bedeutend zur Verbesserung der WASH-Situation beitragen. Ein positives Beispiel ist die „Clean India Mission“, die zu einer langfristigen, deutlichen Abnahme

von offener Defäkation führte (WHO und UNICEF, 2020: 27; Kap. 4.5). Dem indischen Vorbild folgend hat auch Nigeria einen „WASH-Notstand“ ausgerufen und die „Clean Nigeria: Use the Toilet“-Kampagne zur Beendigung von offener Defäkation bis 2025 gestartet (WaterAid, 2024). Die Bundesregierung sollte über die Entwicklungszusammenarbeit Staaten bei Anstrengungen in diesen Bereichen noch stärker unterstützen.

7.5.6

Rohstoffrückgewinnung aus Abwasser fördern

Durch die Reduzierung des Einsatzes fossiler Energieträger werden Gewässerverschmutzungen durch ihre Förderung sowie insbesondere durch die Verbrennung von Kohle vermindert. Das Beispiel Lithium zeigt, dass der mit der Energiewende einhergehende Rohstoffbedarf ebenfalls mit Risiken für die Wasserqualität verbunden ist. Es macht aber auch deutlich, dass eine konsequente, vorausschauende Umsetzung des Leitbilds der Kreislaufwirtschaft diese Risiken erheblich minimieren kann. Die notwendige Abwasserreinigung betrifft dabei besonders den Rohstoffabbau und Recyclingverfahren von Produkten. Dabei sollte eine ressourcenschonende Kombination von Rückgewinnungsprozessen in den Blick genommen werden, welche die weiterführende Abwasserbehandlung und Wiederverwendung von Wasser sowie die Rückgewinnung von Rohstoffen und Energie in einem effizienten Kreislauf beinhaltet (EEA, 2022; VCI, 2017). In Zukunft müssen die Einflüsse von Rohstoffverwendung auf den Wasserhaushalt präventiv quantifiziert werden und durch geschlossene Kreislaufführung sowie eine geeignete ressourcenschonende Industrieabwasseraufbereitung vermieden werden. Zu etablierende Recyclingtechnologien erfordern eine geeignete direkte Wasseraufbereitung zur Rückgewinnung aller gelösten Stoffe und Verbindungen.

7.6

Forschungsempfehlungen

Neue Verfahren für Stoffdesign, Stoffbewertung und Monitoring entwickeln

Der WBGU empfiehlt die Weiterentwicklung der Verfahren für die Chemikalienbewertung und Kennzeichnung, insbesondere zur Vorhersage von Persistenz, Toxizität, Bioakkumulation und Wassermobilität. New Approach Methodologies sollten hierbei besonderes Augenmerk erhalten. Diese sollten durch Forschungsprojekte gezielt gefördert werden, um weitere umfassende, standardisierte Testverfahren etablieren zu können. Methoden zur Erfassung von Persistenz, Toxizität, Bioakkumulation

und Wassermobilität sollten zu einfach messbaren, zweistufigen Hochdurchsatzmethoden vereinigt werden. Im ersten Schritt sollten Stoffe, Mischungen oder andere Umweltproben mit einem umfangreichen Set von Hochdurchsatz-in-vitro-Tests charakterisiert werden, bevor die Substanzen einem biologischen Abbau unterzogen werden, ebenfalls im Hochdurchsatz. Im zweiten Schritt werden die Endprodukte nochmals im umfangreichen Set von Hochdurchsatz-in-vitro Tests geprüft (Escher et al. 2023). So lässt sich Gefahreneinstufung mit der Beurteilung von Persistenz koppeln. Auch KI-Ansätze, wie maschinelles Lernen und neuronale Netze, sollten weiterentwickelt und verpflichtend bei der Bewertung von Stoffeigenschaften werden. Diese Ansätze sowie (bio-) analytische Methoden und Verfahren zum Schutz der Wasserqualität sollten über entsprechende Forschungslinien vorangetrieben werden.

Organische Spurenstoffe in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen

In der Novelle der EU-Kommunalabwasserrichtlinie wird die Entfernung von organischen Spurenstoffen, z. B. Rückständen aus Arzneimitteln und Kosmetika, durch die sogenannte vierte Reinigungsstufe bei Kläranlagen für die EU zukünftig vorgeschrieben. Hierbei handelt es sich um eine technologisch und finanziell aufwändige End-of-Pipe-Lösung. In Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen liegt der Fokus hingegen aktuell auf der Bereitstellung einer grundlegenden Daseinsvorsorge und der Bereitstellung von Wasser in ausreichender Qualität, Sanitärversorgung und Hygiene. Jedoch treten auch hier organische Spurenstoffe aus Kosmetikprodukten oder Arzneimitteln in häuslichen Abwässern auf. Es muss erforscht werden, wie diese mit begrenzten finanziellen Ressourcen und eingeschränkter Verfügbarkeit von Technologien entfernt werden können. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, welche kostengünstigen und einfachen technischen Lösungen, etwa naturnahe Aufbereitungsverfahren oder sequenzielle Grundwasseranreicherung, zur Entfernung von Spurenstoffen eingesetzt werden können.

Geschäftsmodelle für dezentrale Abwassersysteme

Zur Bereitstellung universeller, sicherer Abwasserentsorgung durch dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme, insbesondere in informellen Siedlungen, sind private Dienstleister wichtige Akteure. So fördert beispielsweise die Weltbank bereits Projekte zur Identifikation von Geschäftsmodellen und Möglichkeiten für Public-Private-Partnerships (PPPs) in allen Segmenten der Abwasser-Dienstleistungskette (World Bank, 2022). Die Förderung von PPP-Modellen, bei denen die Kosten und Risiken von Investitionen bei privaten Akteuren liegen, die diese durch kostendeckende Abwassergebühren

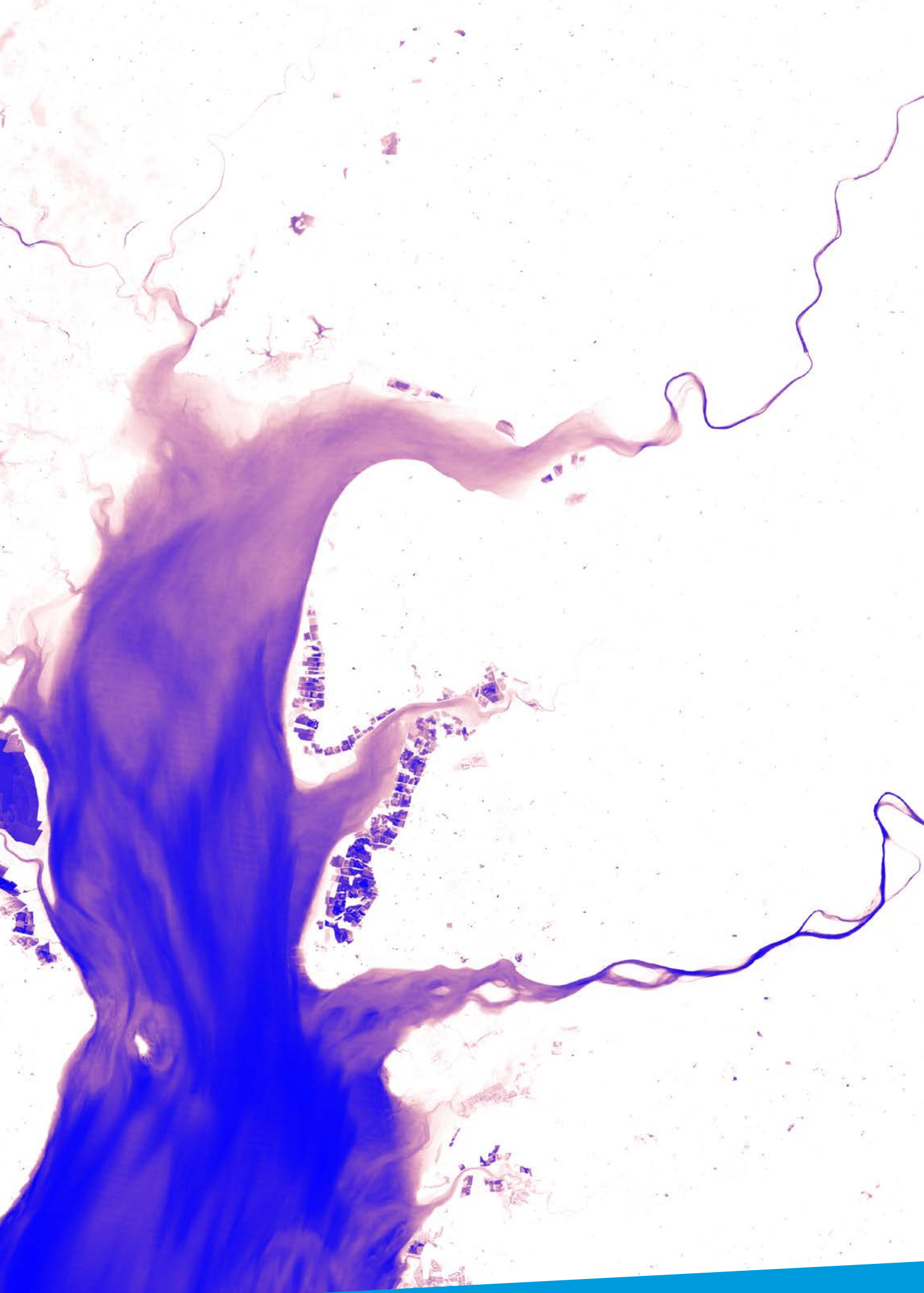
finanzieren sollen, werden zum Teil kritisch gesehen (Heidler et al., 2023). Es wird befürchtet, dass auch bei vermeintlich neuen PPP-Modellen die Fehler wiederholt werden könnten, die in den 1990er Jahren bei der Überführung der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung von der staatlichen Daseinsvorsorge in PPPs gemacht wurden (Heidler et al., 2023). In diesem Kontext empfiehlt der WBGU die Förderung von Forschung, die innovative Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme entwickelt. Zentral sind gemeinsame Forschungsprojekte mit Universitäten und Forschungsinstituten in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen, da diese auch dem Kapazitätsaufbau vor Ort dienen.

Weiterentwicklung dezentraler Abwassersysteme

In allen Segmenten der Abwasserdienstleistungskette (Containment, Entleerung, Transport, Behandlung, Wiederverwendung und Entsorgung) kommen bei dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersystemen verschiedene technische Lösungen zum Einsatz. Bei ihrer Umsetzung können die aus zentralen Abwassersystemen bekannten technischen Lösungen nicht ohne Weiteres übertragen werden, da sich z. B. die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften von Fäkal-schlamm (dezentrale Systeme) und Klärschlamm (zentrale Systeme) unterscheiden (Michalak et al., 2023). Daher besteht Forschungsbedarf bezüglich der Vorhersage der Charakteristika und Menge des in dezentralen, nicht leitungsgebundenen Abwassersystemen anfallenden Fäkal-schlamm, der schnellen Entwässerung des Schlammes zur Volumenreduktion sowie des Verständnisses der mikrobiologischen und physikalisch-chemischen Prozesse in Klärtanks und Latrinengruben (Michalak et al., 2023). Darüber hinaus ist für eine sichere Wiederverwendung des behandelten Fäkal-schlammes Forschung zur Pathogen-Inaktivierung und zu sicheren Verwendungspfaden notwendig.

Weiterentwicklung von Technologien zur Rohstoffgewinnung aus Abwasser

Die aktuellen Technologien zeigen noch einige Nachteile auf, weshalb Forschungsbedarf bezüglich folgender Themen besteht: Stabilität, Energieverbrauch, Selektivität und damit Flexibilität bezüglich unterschiedlicher zu gewinnender Stoffe wie Lithium, Kupfer und Biopolymeren sowie Vermeidung prozessbedingter Sekundärverschmutzungen, z. B. durch Weiterentwicklung von Technologien, die an biologische und solarchemische Prozesse angelehnt sind.



Entwicklung einer klimaresilienten Wassergovernance

8

Als Impuls für die Wasserdiplomatie sollte eine Internationale Wasserstrategie entwickelt werden sowie eine Water Mapping Initiative zur Früherkennung drohender Wassernotlagen. Langfristig sollte die Strategie in ein internationales Abkommen münden. Der Schutz von Wasserressourcen sollte stärker in internationale Wirtschafts- und Handelspolitik einfließen. Wichtig ist das Zusammenspiel staatlicher und selbstorganisierter Governance sowie die Mobilisierung privaten Kapitals. Der Wissenschaft kommt angesichts der notwendigen Anpassungen an fortdauernde Veränderungen eine zentrale Rolle zu.

Es bedarf einer vorausschauenden, lern- und anpassungsfähigen Wassergovernance, um zukünftige regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension zu vermeiden (Kap. 4), einen ausreichenden Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit zu wahren (Kap. 5) und Verteilungskonflikten vorzubeugen. Hierfür ist es wichtig, die globale Dimension regionaler Wassernotlagen und die Grenzen der Anpassung wissenschaftlich zu ermitteln und zu verdeutlichen, dass ihre Verhinderung und Bekämpfung eine internationale Gemeinschaftsaufgabe ist. Insofern gilt es, ein klimaresilientes Wassermanagement auf die internationale Agenda zu setzen, Finanzierungsoptionen vermehrt zu nutzen und Forschung und Bildung zu stärken. Die Staatengemeinschaft muss – wie bei der Vereinbarung der drei Rio-Konventionen (UNFCCC, CBD und UNCCD) – überzeugt und motiviert werden, beim Thema Wasser enger als bisher zusammenzuarbeiten. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, dass die Wissenschaft und die Zivilgesellschaften weltweit eine aktive Rolle übernehmen, um staatliche Wasserk Kooperationen auf wissenschaftlicher Basis zu ermöglichen und lokale Kontexte einzubeziehen. Zudem müssen sie in der Lage sein, die Konsequenzen möglicher fehlender Kooperation aufzufangen.

Der WBGU empfiehlt, die internationale Wassergovernance durch eine neu aufgesetzte Internationale Wasserstrategie fortzuentwickeln. Inhaltliches Fundament sind hierfür die wasserbezogenen Zielformulierungen in der Agenda 2030, insbesondere das Nachhaltigkeitsziel 6,

sowie die Wasserbezüge in den übrigen 16 Zielen. Prozessual bedarf es regelmäßiger, möglichst jährlich stattfindender internationaler Treffen der Staatengemeinschaft, die durch den aktuellen Stand der Forschung zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension informiert und fortentwickelt werden. Die neu aufzusetzende Internationale Wasserstrategie sollte Staaten ermutigen, gut funktionierende regionale oder lokale Selbstorganisation von Wassermanagement zu unterstützen sowie nationale Wasserstrategien zu entwickeln. Letztere erfordern die Organisation eines gesellschaftlichen Prozesses, in dem ausgehandelt wird, welche Risiken akzeptiert und welche vorsorglichen Anpassungen sowie Rahmensetzungen für Transformationen getroffen werden. Soweit möglich sollte dieser Prozess auf Grundlage vorhandener Daten und Modellierungen wissenschaftlich basiert erfolgen. Ferner sollten die nationalen Wasserstrategien ein klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement und kurzfristige Krisenabwehrmechanismen enthalten. Es sollten Anforderungen zur Aufstellung und Umsetzung entwickelt und Schnittstellen zu anderen Abkommen aufgezeigt werden, die sich mit grünem und blauem Wasser befassen.

In einem derartig dynamisch und, trotz oder gerade wegen zunehmender geopolitischer Spannungen kooperativ gestalteten Rahmen sollten bestehende Finanzierungsmöglichkeiten zur Vorsorge, Anpassung und Bekämpfung von Wassernotlagen besser genutzt und neu entwickelt werden. Außerdem bedarf es Maßnahmen, die auf den

grenzüberschreitenden Handel mit wasserintensiven Produkten abzielen.

Das langfristige Ziel der Strategie sollte die Verabschiedung eines verpflichtenden globalen Wasserabkommens durch sämtliche Staaten sein, um vor allem die Defizite der bisherigen Wasserkonventionen für grenzüberschreitende Süßwasserkörper mit ihrem Fokus auf regionale Zusammenarbeit und einer geringen Staatenbeteiligung zu überwinden. Bisher lag die Fokussierung auf der menschlichen Nutzung blauen Wassers. Eine Verpflichtung der Staaten zur Etablierung eines Managements mit grünem und blauem Wasser für Mensch und Natur würde diese bisherige Fokussierung erweitern. Um dies zu erreichen, sollten im Rahmen der Internationalen Wasserstrategie nationale und regionale Strategien, lokale Anpassungsmaßnahmen sowie Mechanismen für die Vorbereitung auf Krisen demokratisch ausgehandelt werden (Abb. 8-1).

Im Folgenden plädiert der WBGU für die Entwicklung einer Internationalen Wasserstrategie (Kap. 8.1). Die Strategie soll auf die Neuaufstellung der internationalen Wasserdiplomatie sowie auf internationale Wasserk Kooperationen ausgerichtet werden. Mit der Entwicklung der Wasserstrategie soll ein Beitrag zu den UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 geleistet werden. Darauf folgt die Hinwendung zur nationalstaatlichen und substaatlichen Ebene. Hier spricht sich der WBGU für einen gestaltenden Staat bei gleichzeitiger Förderung der gesellschaftlichen Selbstorganisation im Wassermanagement aus (Kap. 8.2). Die Zusammenarbeit mit Finanz- und Wirtschaftsakteuren, Wissenschaft und Akteuren des Bildungssektors steht im Zentrum der Kapitel 8.3 und 8.4. In den abschließenden Kapiteln 8.5 und 8.6 befinden sich Handlungs- und Forschungsempfehlungen.



Abbildung 8-1

Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie. Die Internationale Wasserstrategie und nationale Wasserstrategien wirken mit dem lokalen Wassermanagement zusammen. Das lokale Wassermanagement umfasst neben Kommunen alle relevanten Akteure, inklusive selbstorganisierter Strukturen. Nationale Wasserstrategien sollten kohärent mit der Internationalen Wasserstrategie formuliert werden. Sie sollten lokal Maßnahmen des klimaresilienten Managements anstoßen sowie Nothilfe und Krisenmanagement beinhalten.

Quelle: WBGU

8.1

Internationale Verantwortung und Kooperation

Die grenzüberschreitende Wassergovernance sollte auf verschiedenen Ebenen gestärkt werden. Erforderlich ist eine Verantwortungsübernahme und Kooperation auf internationaler Ebene (Kap. 8.1.1), auf regionaler Ebene der Weltregionen (Kap. 8.1.2) sowie transnational durch Wirtschafts- und Handelsbeziehungen (Kap. 8.1.3).

8.1.1

Internationale Wassergovernance stärken

Das Wasservölkerrecht weist gute inhaltliche Ansatzpunkte auf, allerdings zielen diese bislang kaum auf die Bewältigung der oben skizzierten Grenzen der Beherrschbarkeit und der Bekämpfung regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension. Wasserprobleme werden bisher vor allem als lokale und regionale Phänomene verstanden und behandelt (Weiss, 2012). Im Folgenden wird daher erläutert, wie die internationale Wasserdiplomatie neu aufgestellt werden kann, um diesen Herausforderungen effektiv zu begegnen (Kap. 8.1.1). Gleichzeitig ist mehr Verantwortungsübernahme und Koordination auf regionaler und multilateraler Ebene erforderlich. Regionalorganisationen wie der Afrikanischen Union oder regionalen Entwicklungsgemeinschaften fehlt es an Koordinationsmechanismen und Instrumenten der Rechtsdurchsetzung gegenüber den Mitgliedstaaten. Dies betrifft z. B. regionale Akteure wie die Westafrikanische Wirtschaftsgemeinschaft (ECOWAS), die Ostafrikanische Gemeinschaft (EAC), die Entwicklungsgemeinschaft des südlichen Afrikas (SADC), den Verband Südostasiatischer Nationen (ASEAN) und die lateinamerikanische Organisation MERCOSUR. Sie könnten jedoch eine wichtige Rolle in der Umsetzung der Ziele der vom WBGU vorgeschlagenen internationalen Wasserstrategie übernehmen (Kap. 8.3.2). Schließlich sollte Verantwortung im Sinne des neuen Leitbilds Wasser als *common concern of humankind* auch durch stärkere Berücksichtigung der Ziele und Inhalte einer Internationalen Wasserstrategie in Wirtschafts- und Handelsbeziehungen übernommen werden. Hierfür sollte Wasser besser in wirtschaftliche Entscheidungen auf internationaler Ebene integriert und internationale Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik an den Zielen einer Internationalen Wasserstrategie ausgerichtet werden. Länder niedrigen und mittleren Einkommens sollten hierbei durch enge Kooperation unterstützt werden (Kap. 8.3.3).

8.1.1.1

Die Agenda 2030 als normatives Fundament internationaler Wasserk Kooperation

Wasser spielt eine zentrale Rolle für die Erreichung der Ziele nachhaltiger Entwicklung (SDGs) der Agenda 2030. Neben dem zentralen Nachhaltigkeitsziel 6 (SDG 6) „Sauberes Trinkwasser und Sanitärversorgung für alle“ ist Zugang zu Wasser, seine Verfügbarkeit und Qualität Voraussetzung für die Erreichung vieler anderer SDGs. Es sollte daher in allen Politikbereichen mitgedacht werden. Zwar wurden beim Zugang zu Wasser und Wasserqualität wichtige Fortschritte verzeichnet, insgesamt aber zeigt die Halbzeitbilanz der Agenda 2030, dass die bisherigen Anstrengungen nicht ausreichen.

Als Erfolg kann gewertet werden, dass der Anteil der Menschen mit Zugang zu sicherem Trinkwasser 2015–2022 weltweit von 69 % auf 73 % anstieg. 687 Mio. Menschen erhielten Zugang zu sicherem Trinkwasser. Die Trends in den Bereichen Sanitärversorgung und Hygiene sind ebenfalls positiv: Die Zahl der Menschen mit Zugang zu sicherer Sanitärversorgung stieg um 911 Mio. und zu grundlegenden Hygieneleistungen um 637 Mio. (UN, 2023c). Trotzdem hatten im Jahr 2022 immer noch 2,2 Mrd. Menschen keinen Zugang zu qualitätsgesichertem Trinkwasser und 3,5 Mrd. Menschen fehlte der Zugang zu sicher bewirtschafteten sanitären Anlagen. Zudem hatten zwei Mrd. Menschen keine Möglichkeit sich die Hände mit Seife zu waschen (UN, 2023c). Die Effizienz der Wassernutzung ist um 9 % gestiegen, Wasserstress und Wasserknappheit bleiben jedoch ein Problem. Im Jahr 2020 lebten 2,4 Mrd. Menschen in Ländern, die von Wasserstress betroffen sind. Auch die Ökosysteme und Arten stehen unter Druck. Seit 1970 sind die Populationen von 81 % der Arten, die auf Binnenfeuchtgebiete angewiesen sind, zurückgegangen. Was die grenzüberschreitende Governance betrifft, so haben nur 32 von 135 betroffenen Ländern den Großteil (über 90 %) ihrer grenzüberschreitenden Gewässer durch operative Vereinbarungen abgedeckt (UN, 2023c).

Abb. 8.1-1 zeigt den weltweiten Status der Umsetzung des SDG 6. Global gibt es Fortschritte, die sich aber auf Länderebene stark unterscheiden. Die Auswertung des Fortschritts attestiert Deutschland, zur Halbzeit im September 2023 den sich selbst vorgenommenen Fortschritt für SDG 6 erreicht zu haben (SDSN, 2023). Gleichzeitig zeigt das vorliegende Gutachten einen weltweit dringenden Bedarf, grenzüberschreitende Wasserk Kooperationen auszubauen und entlang der in der Agenda 2030 formulierten Ziele einen notwendigen Strukturwandel für nachhaltiges Wassermanagement zu gestalten. Eine integrierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen bis 2030 auf allen Ebenen ist noch nicht verwirklicht (UN, 2023c). Insgesamt gilt: Hoheinkommensländer müssen ihre Ambitionen steigern und die nationale Indikatorik

mit Blick auf Gewässerschutz, Senkung von Wasserstress und grenzüberschreitende Effekte in die Umsetzung tragen. Auch hier gilt, dass keines dieser Ziele bis 2030 erreicht wird, wenn die Umsetzung im bisherigen Tempo fortgesetzt wird (SDSN, 2023).

Vor diesem Hintergrund und der wissenschaftlich umfangreich dokumentierten Tatsache des global steigenden Wasserstresses (Kap. 4) ist es von zentraler Bedeutung, Wasser als Thema neben der Umsetzung der Agenda 2030 in den sich anbahnenden Diskussionen zu einer möglichen Post-2030-Agenda zentral zu positionieren:

1. Aufgrund der Vernetzung und Wechselwirkungen von Wassermanagement und der Breite klimatischer, ökologischer, sozialer, (geo-)politischer und ökonomischer Herausforderungen weltweit ist weiterhin eine internationale Verantwortungsübernahme für Wasserverfügbarkeit und -qualität von zentraler Bedeutung. Es sollte gelingen, auch nach 2030 eine durch die internationale Staatengemeinschaft gemeinsam
2. Hierbei ist die zentrale Positionierung klimaresilienten und sozialverträglichen Managements von grünem und blauem Wasser unabdingbar. Dies sollte bereits jetzt in den Modellentwicklungen für alternative Wohlstandsmessungen (anstelle des Bruttoinlandsprodukts, BIP) mitgedacht und in diese, wo möglich, integriert werden (Dixon-Decleve et al., 2022; Lima de Miranda und Snower, 2020). Diese Erkenntnis sollte sich auch in einer Post-2030-Agenda niederschlagen. Wichtig ist hierbei, die besondere Betroffenheit und Belastung von Frauen und anderen marginalisierten Gruppen im Zusammenhang mit Wasser (Wasser holen, Nutzung von Wasser im Zusammenhang mit Care-Arbeit, Periodenhygiene) zu beachten und Geschlechtergerechtigkeit zu gewährleisten.

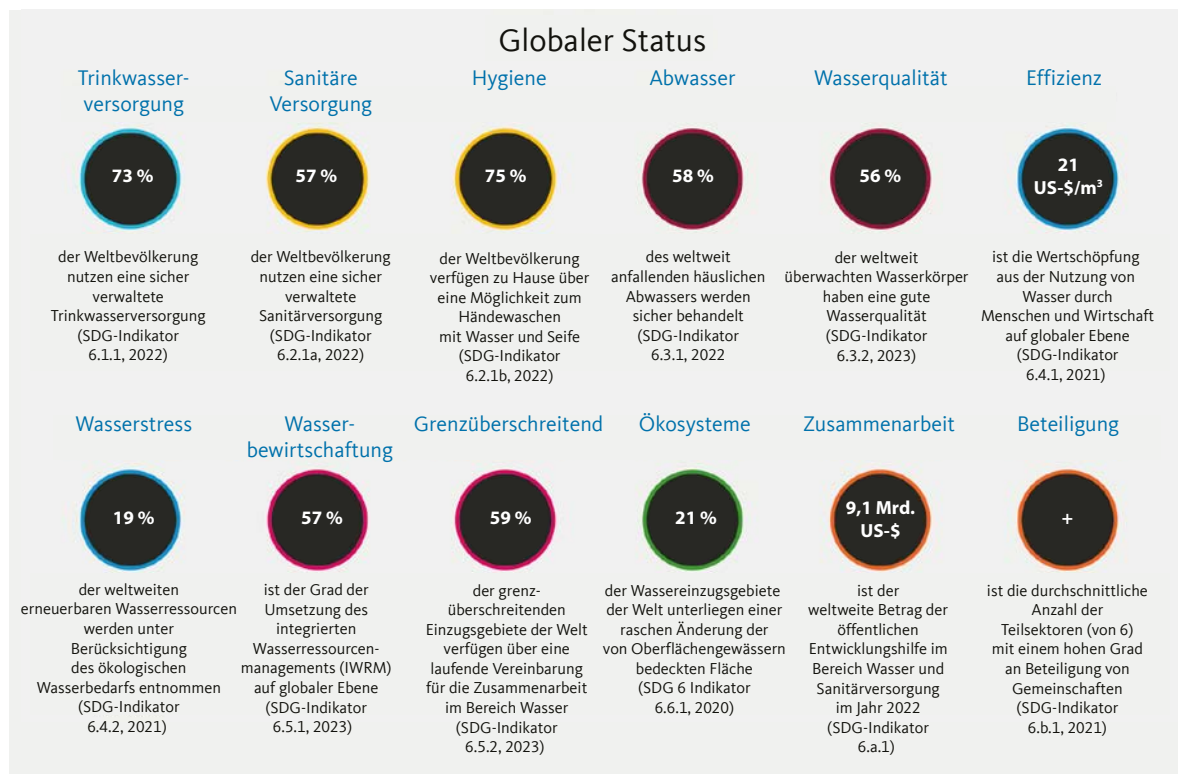


Abbildung 8.1-1

Globaler Status der Zielerreichung von SDG 6. Die globalen Schätzungen basieren auf Daten einzelner Länder, die von den zuständigen Organisationen der Vereinten Nationen zusammengestellt und verifiziert wurden, und zum Teil durch Daten aus anderen Quellen ergänzt wurden. Es gibt 11 Indikatoren, um die Zielerreichung von SDG 6 zu ermitteln. Für einige Indikatoren standen jedoch nicht genügend Daten zur Verfügung, um eine Schätzung auf globaler Ebene vornehmen zu können.

Quelle: UN, 2024

3. Neben dieser orientierungsstiftenden Zielformulierung sollten auch Grundlagen für eine erfolgreiche Umsetzung geschaffen werden. Eine Post-2030-Agenda sollte zentrale Zielkonflikte und Synergien im Zusammenhang mit Wasser beinhalten und kontextspezifisch passende systemische Wasserpolitiken beispielhaft skizzieren. Gleichzeitig sollte ihre Weiterentwicklung und Anpassung in den jeweils lokal unterschiedlichen Kontexten angeregt werden.
4. Eine Post-2030-Agenda sollte zudem in Bezug auf Wasser entstehende Spillover-Effekte berücksichtigen. Dies sollte bereits heute in Instrumente der Wirtschafts- und Handels- sowie Umwelt- und Sozialpolitik wie auch in die zu erstellende Indikatrix für eine Post-2030-Agenda eingeführt werden (Kap. 8.3.3.1).

Für Europa und Deutschland ist in diesen vorbereitenden Prozessen zu bedenken, dass in der Verhandlung der Agenda 2030 in den Jahren vor ihrer Verabschiedung 2015 die EU eine zentrale, gestaltende und global integrierende Rolle übernahm. Ohne die globale Meinungsführerschaft der EU in diesem Prozess wäre die Agenda 2030 mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht möglich gewesen. Heute, nach einer globalen Pandemie, gefolgt von einer Schulden- und globalen Vertrauenskrise, Kriegen in Europa, dem Nahen Osten und Subsahara-Afrika, hat die Agenda 2030 trotz ihrer erneuten Bestätigung in New York 2023 signifikant an politischem Einfluss und Zugkraft verloren. Ihre unzureichende Umsetzung dominiert die Diskussionen zur Agenda, nicht die durch sie ermöglichten Fortschritte. Die von EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen vorgelegten „Political Guidelines for the next European Commission 2024-29“ erwähnen die Agenda 2030 oder die Ziele nachhaltiger Entwicklung mit keinem Wort. Gerade aber vor dem Hintergrund einer im Januar 2024 vollzogenen Erweiterung der BRICS+-Staatengemeinschaft, der sukzessiven „Entdollarisierung“ globaler Handelsflüsse und eines stetig weiter voranschreitenden Ausbaus der Shanghai-Organisation für Zusammenarbeit erscheint dies geopolitisch strategisch als zu kurz betrachtet. Statt lediglich auf einen in Teilen des südlichen Afrikas als „green colonialism“ wahrgenommenen Green Deal und Global Gateway als Antwort auf die Belt and Road Initiative Chinas in seinen externen Beziehungen zu setzen, sollten sich Europa und Deutschland die Bedeutung einer globalen Meinungsführerschaft für nachhaltige Entwicklung und Zukunft bewusst machen. Es geht um nichts Geringeres als darum, mittels einer weiteren Ausgestaltung der Agenda 2030 und dem Ausbau der Diskursstrukturen für eine Post-2030-Agenda eine lebenswerte Zukunft innerhalb planetarer ökologischer, gesellschaftlicher, ökonomischer und politischer Grenzen für Menschen weltweit sicherzustellen. Dies erfordert eine globale Kooperationsagenda

für die Zukunft. Und es benötigt progressive Allianzen, die von Europa aus mit gleichgesinnten Kräften auf allen Kontinenten gesucht und ausgebaut werden. Es geht darum, zukunftsfähige Antworten auf soziale Polarisierung, Autokratisierung und Geopolitisierung zu finden, die dem gemeinsamen und kooperativem Umgang mit den globalen ökologischen und ökonomischen Herausforderungen diametral gegenüberstehen.

Hierbei bedarf es geeigneter Einstiegspunkte, um die mit einer möglichen Post-2030-Agenda intendierte Transformation zu ermöglichen. Der Globale Bericht zur nachhaltigen Entwicklung 2023 gibt hierfür sechs Empfehlungen (UN, 2023a). Es handelt sich um integrierte und transformative Maßnahmen – auch „transformative shifts“ genannt –, die zu einer Beschleunigung der Zielerreichung auf Grundlage von Szenarienforschung führen sollen und die auch für eine mögliche Post-2030-Agenda relevant sind: (1) menschliches Wohlbefinden und Fähigkeiten, (2) nachhaltige und gerechte Volkswirtschaften, (3) nachhaltige Lebensmittelsysteme und gesunde Ernährung, (4) Dekarbonisierung der Energie mit allgemeinem Zugang, (5) urbane und periurbane Entwicklung und (6) globale Umweltgüter.

Für den Bereich Wasser bedeutet dies: Für transformative Veränderungen bzw. Fortschritte im Bereich „menschliches Wohlbefinden und Fähigkeiten“ sind u. a. erhöhte Investitionen in die Wasser- und Sanitärinfrastruktur notwendig, um einen universellen Zugang zu Trinkwasser zu gewährleisten und die Menge an unbehandeltem Abwasser zu halbieren. Für transformative Veränderungen bzw. Fortschritte bei Schutz und Erhaltung globaler Umweltgüter muss u. a. der Wasserverbrauch durch Haushalte, landwirtschaftliche Betriebe und die Industrie reduziert werden (UN, 2023a: XXII f.).

8.1.1.2

Gelegenheitsfenster und Schnittstellen auf globaler Ebene

Die internationale Wasserpolitik befindet sich derzeit inmitten einer außergewöhnlich aktiven Phase (Abb. 8.1-2).

Die UN-Wasserkonferenz im März 2023 führte zu einem vertieften transnationalen Dialog und neuen Ansätzen globaler Wassergovernance. Die Water Action Agenda, die aus der Konferenz 2023 resultierte, enthält über 700 freiwillige Verpflichtungen. Relativiert wird das Ergebnis der UN-Wasserkonferenz durch die Unverbindlichkeit der Zusagen. Zudem wurden zahlreiche Reformvorschläge zur globalen Wassergovernance nicht in einer gemeinsamen, verbindlichen Entscheidung festgehalten. Nur in 28 % der Verpflichtungen werden klare Finanzierungsquellen genannt und nur in 22 % der bis Ende März 2023 eingereichten Verpflichtungen sind quantitative Zielvorgaben für Ergebnisse enthalten (Iceland und Black, 2023). Von zentraler Bedeutung für

Vereinte Nationen	Internationale Aktionsdekade der UN „Wasser für Nachhaltige Entwicklung“ (2018–2028)					
	★ 2023	2024	2025	★ 2026	2027	★ 2028
UNEP	UN-Wasserkonferenz (erstmalig seit 1977)			UN-Wasserkonferenz		UN-Wasserkonferenz
		UNEA-6		UNEA-7		UNEA-8
SDGs	SDG-Gipfel	Summit of the Future				
UNFCCC	COP 28	COP 29	COP 30	COP 31	COP 32	COP 33
CBD		COP 16		COP 17		COP 18
UNCCD		COP 16		COP 17		COP 18
G7	G7	G7	G7	G7	G7	G7

Abbildung 8.1-2
Wasserpolitische Governanceprozesse 2023–2028. Der Zeitstrahl zeigt die zeitliche Abfolge verschiedener wasserpolitischer Governanceprozesse: Treffen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP), Internationale Konferenzen zu nachhaltigen Entwicklungszielen (SDGs), Klima (UNFCCC), Biodiversität (CBD), Desertifikation (UNCCD) sowie voraussichtliche Treffen der G7-Wasserkoalition. Die UN-Wasserkonferenzen sind durch einen Stern gekennzeichnet.
Quelle: WBGU

die Weiterentwicklung der internationalen Wassergovernance sind die geplanten UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 (UNGA, 2023). Auf diesen sollten nach Überzeugung des WBGU die bisherigen guten Ansätze fortentwickelt, angereichert und in eine Internationale Wasserstrategie überführt werden. Aufgebaut werden kann auf die wasserbezogenen multilateralen Aktivitäten, die sich überwiegend an der Agenda 2030 orientieren (Kap. 8.1.1) sowie gegebenenfalls am „Pact for the Future“, der aus dem Zukunftsgipfel vom September 2024 in New York resultiert.

Auf den regelmäßig stattfindenden Vertragsstaatenkonferenzen zur Bekämpfung des Klimawandels (UNFCCC), zum Schutz der Biodiversität (CBD) und zur Bekämpfung von Desertifikation (UNCCD) werden auch wasserspezifische Themen verhandelt (Kap. 8.1.1.3). Darüber hinaus haben die G7-Staaten 2024 eine „G7-Wasserkoalition“ gegründet, um gemeinsame Ziele und Strategien zur Bewältigung der globalen Wasserkrise zu koordinieren (G7, 2024).

8.1.1.3
Internationale Wasserdiplomatie stärken

Wasserdiplomatie umfasst Aushandlungsprozesse zum Umgang mit Wasser auf allen Ebenen, die international angestoßen werden (Grech-Madin et al., 2018). Das Politikfeld Wasser zeichnet sich neben der Mehrebenengovernance durch seine grenzüberschreitende Dimension und vielfältigen Schnittstellen zu anderen Governanceprozessen aus. Aus Sicht des WBGU sollte eine Internationale Wasserstrategie mit den Politikbereichen Nachhaltige Entwicklung, Klima, Biodiversität und Landdegradation abgestimmt werden (Abb. 8.1-3).

Dieser Mainstreaming-Ansatz erfordert eine enge Zusammenarbeit der unterschiedlichen Ressorts auf politischer und administrativer Ebene. Während die Integration von Wassergovernance innerhalb verwandter Politikprozesse wichtig bleibt, sollte darüber hinaus auch ein spezifischer Prozess für eine Internationale Wasserstrategie gestärkt und institutionell ausgebaut werden. Akteure, die bereits jetzt an Schnittstellen arbeiten, sollten diesen Prozess aktiv mitgestalten können.

Grünes und blaues Wasser sollten in den Prozessen der drei Rio-Konventionen (Klima, Biodiversität, Landdegradation) als eigene Dimension integriert und stärker sichtbar werden, z. B. bezüglich Wasserverfügbarkeit und -qualität für Mensch und Natur sowie Anpassungszielen an die neuen Gefährdungen (Abb. 8.1-3). Das heißt, sie sollten mit eigenen Indikatoren in den nationalen Umsetzungsmechanismen des Pariser Übereinkommens und des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal (GBF) und im strategischen Rahmen der UNCCD integriert und stärker sichtbar werden (Tabelle 8.1-1).

Schnittstelle Klimagovernance

Die Schnittstelle zu Klimagovernance ist von hoher Relevanz, da Klimaschutz erhebliche positive wie negative Effekte auf Wasser haben kann. Das Pariser Übereinkommen hat neben dem Ziel der Begrenzung des Temperaturanstiegs auf möglichst 1,5 °C, auf jeden Fall aber auf deutlich unter 2 °C, auch ein globales Anpassungsziel, um „die Anpassungsfähigkeit zu verbessern, die Widerstandsfähigkeit zu stärken und die Anfälligkeit gegenüber dem Klimawandel zu verringern, um so zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen“ (Art. 7). Die Verankerung wasserbezogener Anpassungsziele und



Abbildung 8.1-3

Schnittstellen einer zu entwickelnden Internationalen Wasserstrategie. Die Agenda 2030 bildet bisher das Fundament für die Mehrzahl wasserrelevanter Politikprozesse. Die drei relevantesten Schnittstellen auf globaler Ebene betreffen aus Sicht des WBGU folgende Bereiche: Klima (UNFCCC), Biodiversität (CBD) und Desertifikation (UNCCD). Regionale, nationale und lokale Wasserstrategien können weitere Schnittstellen eröffnen, wie z. B. die Nationale Wasserstrategie Deutschlands.

Quelle: WBGU

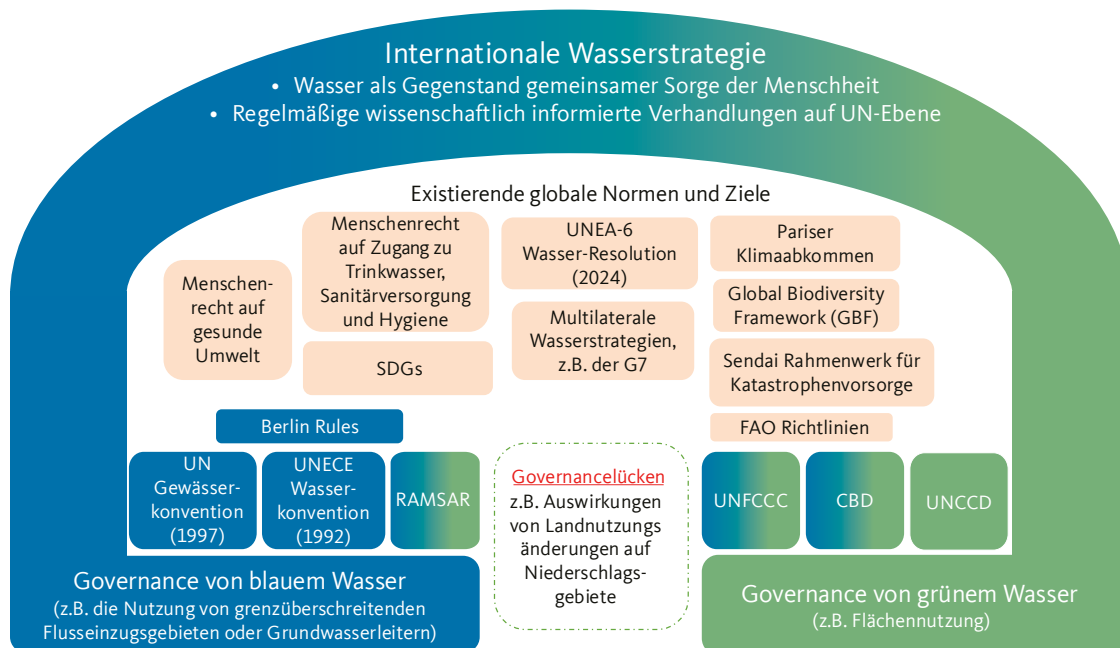


Abbildung 8.1-4

Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie mit Governance zu blauem und grünem Wasser. Prozedural bietet die Internationale Wasserstrategie dafür einen institutionellen Rahmen. Inhaltlich sollte sie Bezug nehmen auf bestehende Konventionen und globale Normen. Eine solche Internationale Wasserstrategie würde der Staatengemeinschaft die Möglichkeit bieten, von einer bisher fragmentierten hin zu einer möglichst kohärenten Wassergovernance zu kommen (Herrfahrdt-Pähle et al., 2019: 9).

Quelle: WBGU

Tabelle 8.1-1

Übersicht der Schnittstellen von Wassergovernance zu laufenden Prozessen der internationalen Umweltpolitik. Die relevantesten Schnittstellen auf internationaler Ebene sind aus Sicht des WBGU die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung sowie die Prozesse der drei Rio-Konventionen zu Klimaschutz, Biodiversität und Desertifikation.
Quelle: WBGU

Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung	Pariser Übereinkommen für Klimaschutz unter der UNFCCC	Globaler Biodiversitäts-rahmen von Kunming-Montreal (GBF) unter der CBD	UNCCD-Strategierahmen 2018–2030. Ziel: Neutralität der Landdegradation
> SDG 6 als Hauptschnittstelle > Wasser betrifft alle Ziele der Agenda 2030 > Entwicklungsfinanzierung	> Klimaanpassung, Minderung > Schäden und Verluste > Klimafinanzierung	> Biodiversitätsschutz und Wiederherstellung von Ökosystemen > Nachhaltige Nutzung > Zugang und gerechte Verteilung von Nutzen > Biodiversitätsfinanzierung	> Bekämpfung von Landdegradation und Dürrefolgen > Renaturierung von Landflächen > Finanzierung u. a. über Globalen Mechanismus
Jeweilige Strategien auf staatlicher Ebene als potenzielle Schnittstellen für Wassergovernance			
> Nationale Nachhaltigkeitsstrategien (National Sustainable Development Strategies (NSDS))	> Nationale Klimaschutzpläne (Nationally Determined Contributions, NDCs) > Nationale Anpassungspläne (National Adaptation Plans, NAPs)	> Nationale Biodiversitätsstrategien und Aktionspläne (National Biodiversity Strategies and Action Plans, NBSAPs)	> Nationale Aktionsprogramme und deren Überprüfung auf Basis des Performance Review and Assessment of Implementation System (PRAIS)

Indikatoren im globalen Anpassungsziel wurde auf der COP28 von zahlreichen Akteuren des Wasserbereichs gefordert (Water for Climate Pavilion, 2024). Ab 2024 wird ein neues Klimafinanzierungsziel (New Collective Quantified Goal on Climate Finance, NCQG) verhandelt, das sowohl für Minderung als auch für Klimaanpassung, und somit für Wassergovernance und Zusammenarbeit eine hohe Relevanz hat (UNFCCC, 2024b).

Das Pariser Übereinkommen wird mittels Nationalen Klimaschutzplänen (Nationally Determined Contributions, NDCs) umgesetzt, die anhand eines verpflichtenden Pledge-and-Review-Mechanismus überprüft werden. Während einige Länder Anpassungsziele und -maßnahmen in ihren NDCs formulieren, haben rund 50 Länder zusätzlich Nationale Klimaanpassungspläne (National Adaptation Plans, NAPs) eingereicht. Die Tendenz ist steigend: Insgesamt haben bereits 142 Länder Interesse an einem NAP-Prozess signalisiert (UNFCCC, 2023c). Die Ausarbeitung von NAPs gilt als strategischer Prozess, der es den Ländern ermöglicht, ihre mittel- und langfristigen Prioritäten für die Anpassung an den Klimawandel zu ermitteln und anzugehen (NAP Global Network, 2020). Der Green Climate Fund (GCF) spielt eine entscheidende Rolle bei der Unterstützung der Umsetzung von NAPs (UNFCCC, 2023a). Für den Wiederaufbau nach klimabedingten Extremereignissen ist der Mechanismus für „Schäden und Verluste“ (Loss and Damage) als Teil des

Pariser Übereinkommens etabliert worden, der im Jahr 2023 erstmals finanzielle Zusagen erhielt und übergangsweise bei der Weltbank angesiedelt wurde.

Der Mechanismus soll Gelder zur Verfügung stellen für klimawandelbedingte Schäden und Verluste nach extremen Wetterereignissen (z. B. Dürren oder Fluten) und für die Folgen langsam einsetzender Auswirkungen des Klimawandels wie Meeresspiegelanstieg, Desertifikation oder Abschmelzen von Gletschern (UNFCCC, 2024a). Neben der Klimaanpassung hat auch die Minderung von Treibhausgasemissionen und somit die Energiewende eine hohe Bedeutung für Wasser und dessen Management (UNESCO, 2024: 65). Dies umfasst die Wahl der Technologien zur Emissionsreduktion im Energiesektor ebenso wie alternative Landnutzungspraktiken. So besteht beispielsweise bei der stärkeren Nutzung von Wasserkraft und anderen wasserintensiven Technologien das Risiko einer steigenden Wassernachfrage (Kap. 7.4; UNESCO, 2024: 69). Der Betrieb von Kraftwerken mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) ist sehr energie- und wasserintensiv. Einer Studie zufolge würde „der flächendeckende Einsatz von CCS zur Erreichung des 1,5°C-Klimaziels den anthropogenen Wasserfußabdruck fast verdoppeln“ (Rosa et al., 2021: 1).

Schnittstelle Biodiversität

Neben den bereits erwähnten Verhandlungen der Post-2030-Agenda (Kap. 8.1.1.1) bietet die Biodiversitätsgovernance ein weiteres Gelegenheitsfenster für die Weiterentwicklung wasserbezogener Biodiversitätsziele. Der 2022 beschlossene Globale Biodiversitätsrahmen von Kunming-Montreal (GBF) wird durch nationale Strategien und Aktionspläne umgesetzt, die sich derzeit in vielen Ländern in Überarbeitung befinden. Hierbei können integrierte Landschafts- und Mosaikansätze die Integration von Wasser ermöglichen (Kap. 8.5).

Das GBF setzt vier Langfristziele bis 2050 und 23 Handlungsziele, die global und bis 2030 zu erreichen sind, um den Biodiversitätsverlust zu stoppen und die biologische Vielfalt zu erhalten. Die ersten drei Handlungsziele des GBF adressieren die anthropogene Flächennutzung an Land und Meer, eine der Hauptursachen für den Verlust wasserbezogener Ökosysteme. Doch auch die Umsetzung der anderen Handlungsziele ist essenziell für die Erhaltung wasserbezogener Ökosysteme und Ökosystemleistungen (CBD, 2023). Dies umfasst z. B. die nachhaltige Nutzung der Biodiversität und die nachhaltige Produktion in Landwirtschaft, Fischerei oder Forstwirtschaft bzw. nachhaltige Konsumententscheidungen (Handlungsziele 10 und 16); die Reduktion von Verschmutzung von Ökosystemen (Handlungsziel 7); den Ausbau von grün-blauer Infrastruktur im urbanen Raum (Handlungsziel 12), den Umgang mit invasiven Arten (Handlungsziel 6) und die Nutzung von Synergien zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz (Handlungsziel 8).

Schnittstelle Desertifikation und Landdegradation

Die Verhinderung von Landdegradation, die Wiederherstellung degradiertter Landflächen und die Bewältigung von Dürrefolgen durch nachhaltige Landnutzung sind in der UN-Desertifikationskonvention (UNCCD) verankert. Damit ist die UNCCD ein zentraler Baustein zur Sicherung der Wasserspeicherfähigkeit von Böden und für die Erhaltung grünen Wassers. Die Konvention geht in ihrem Anwendungsbereich über Trockengebiete hinaus. Mit der Aufnahme des Ziels der Land Degradation Neutrality in den Katalog der SDGs wurde 2015 vereinbart, bis 2030 eine „land degradation-neutral world“ zu erreichen (SDG 15 und 15.3). Landdegradation soll dabei wieder ausgeglichen werden, etwa durch Renaturierungsmaßnahmen, so dass in der Summe keine Degradation mehr stattfindet und der Nettoeffekt bezogen auf Landdegradation Null beträgt (Wunder et al., 2018). Diese Ziele sind auch im Strategischen Rahmenwerk 2018–2030 der UNCCD festgelegt, das die Grundlage für die Umsetzung der Ziele der Konvention auf nationaler Ebene ist.

Zwischenfazit: Gelegenheitsfenster in den kommenden Jahren nutzen

Nach Überzeugung des WBGU bedarf es eines neuen Impulses für die bislang zu fragmentierte und wenig effektive Internationale Wassergovernance, um Grenzen der Beherrschbarkeit sowie regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension zu erfassen und angemessen zu berücksichtigen. Die internationalen Möglichkeitsfenster öffnen sich in den kommenden Jahren. Dieser Impuls sollte in einer internationalen Strategie münden, die gegebenenfalls auf den Ergebnissen des UN-Summit of the Future aufbauen kann. Der neue Impuls sollte insbesondere auch die für 2026 geplante UN-Wasserkonferenz informieren.

8.1.1.4

Ausgestaltung einer Internationalen Wasserstrategie

Ähnlich dem GBF, das als Soft Law die Biodiversitätskonvention für den Zielhorizont bis 2030 ergänzt, bedarf es langfristig auch für die Internationale Wassergovernance einer Politikplanung zumindest bis 2030, die die Agenda 2030 berücksichtigt. Internationale Wassergovernance kann an bestehende Ziele, Inhalte und Maßnahmen des Wasservölkerrechts anknüpfen, muss allerdings auch darüber hinausgehen (Abb. 8.1-4). Diese Soft-Law-Strategie könnte in Analogie zu dem von der Staatengemeinschaft akzeptierten GBF als Internationale Wasserstrategie bezeichnet werden. Sie hat ihren Ausgangspunkt in der Anerkennung des Schutzes von Wasserressourcen als Gegenstand gemeinsamer Sorge der Menschheit (common concern of humankind), das flankiert wird durch ein universelles Menschenrecht auf Wasser (Kasten 8.1-1).

Der vorgeschlagene Soft-Law-Prozess schließt direkt an die Resolution der UN-Generalversammlung an, die die Absicht bekundet hat „weitere Möglichkeiten zur aktiven Einbeziehung von Regierungen, der Zivilgesellschaft, des Privatsektors, des Systems der Vereinten Nationen und anderer Akteure in Betracht zu ziehen, um Fortschritte voranzutreiben und die Verwirklichung von international vereinbarten wasserbezogenen Zielen und Vorgaben zu unterstützen [...]“ (UNGA, 2023, Para. 3).

Dabei ist wichtig zu betonen, dass der Hauptzweck einer Internationalen Wasserstrategie zunächst das Bereitstellen einer Austauschplattform für Staaten und andere relevante Akteure ist, die sich auf unverbindliche Normen der Wassergovernance verständigen sollen. Denn wie die geringen Ratifikationszahlen der beiden völkerrechtlichen Verträge UN-Wasserlaufkonvention und UNECE-Wasserkonvention verdeutlichen (Kap. 2.4.2.1), fehlt es bei zentralen Fragen der grenzüberschreitenden Regulierung von blauem Wasser am nötigen Staatenkonsens; bei grünem Wasser fehlen zum Teil sogar Daten und Erfahrungswissen. Die Internationale Wasserstrategie

besteht also sowohl aus einem Prozess, als auch aus inhaltlichen Eckpunkten (Kap. 8.1.1). Dabei sollen zum einen Parallelstrukturen vermieden, zum anderen aktuelle Prozesse institutionell verstetigt werden. Da wie gezeigt bereits mehrere Diskussions- und Dialogforen zu Wasser existieren, sollte die Internationale Wasserstrategie zwar eine Plattform für Austausch und Koordinierung bieten, aber auch darüber hinausgehen und als internationale, zusammenhängende Strategie konkrete, wenn auch nicht sanktionsbewehrte, Regelungen sowie Ziele und

Prinzipien erarbeiten. Hierzu zählen Verfahrensregeln wie Berichtspflichten zu freiwilligen Verpflichtungen, etwa jenen, die im Rahmen der Water Action Agenda bei der Weltwasserkonferenz 2023 eingegangen wurden. Quantifizierbare Ziele und Berichtspflichten ermöglichen erst eine Überprüfung der Einhaltung der Zusagen. Mangels Verbindlichkeit wäre eine Zielverfehlung zwar nicht sanktionsbewehrt, jedoch wären Vergleiche zwischen Staaten möglich und „naming and shaming“ stünde als weicher Durchsetzungsmechanismus zur Verfügung (von

Kasten 8.1-1

Das Menschenrecht auf Wasser als Teil des Menschenrechts auf eine gesunde Umwelt

Eine ausdrückliche Nennung eines allgemeinen, also nicht auf bestimmte Personengruppen beschränkten, Menschenrechts auf Wasser im Völkervertragsrecht existiert bislang nicht. Allerdings wird teilweise angenommen, dass sich ein solches aus dem Internationalen Pakt über wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte (UN-Sozialpakt) von 1966 ableiten lässt (Cullet und Koonan, 2017; Laskowski, 2010). Der UN-Sozialpakt wurde von 172 Staaten ratifiziert, allerdings nicht von den USA. Im Rahmen des UN-Sozialpakts beinhaltet das Menschenrecht auf Wasser ein Recht auf „ausreichendes, sicheres, akzeptables, physisch zugängliches und erschwingliches Wasser für den persönlichen und häuslichen Gebrauch“ (UN, 2002, Para. 2). Die Wassermenge soll ausreichend sein, „um den Tod durch Austrocknung zu verhindern, das Risiko wasserbedingter Krankheiten zu verringern und die Bedürfnisse in den Bereichen Konsum, Kochen, persönliche und häusliche Hygiene zu erfüllen“ (UN, 2002, Para. 2). Das Recht umfasst den angemessenen und diskriminierungsfreien Zugang zu Wasser. Angemessenheit bedeutet nach dem Ausschuss für wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte: Verfügbarkeit (mindestens 20 Liter täglich pro Person entsprechend WHO-Empfehlungen), Qualität (Freiheit von Mikroorganismen, chemischen Stoffen und radiologischen Gefahren in gesundheitsgefährdender Menge) und Zugänglichkeit (physische und wirtschaftliche Erreichbarkeit, Nichtdiskriminierung und Zugang zu Informationen über Wasserthemen; UN, 2002). Das Recht auf Wasser im UN-Sozialpakt wird ganzheitlich betrachtet, d. h. es umfasst nicht nur das Recht auf Trinkwasser, sondern auch auf sanitäre Einrichtungen bzw. Abwasserbeseitigung: Wasser wird als essenzielle Ressource verstanden, die nicht nur für die Trinkwasserversorgung relevant ist, sondern auch für den persönlichen Gebrauch im Haushalt sowie zur Adressierung von Gesundheitsaspekten (Laskowski, 2010).

Das Recht enthält Freiheits- und Leistungsansprüche. Erstere umfassen den Zugang zu vorhandenen Versorgungssystemen, insbesondere Wasserinfrastruktur, und schützen vor Eingriffen wie willkürlicher Unterbrechung oder Verunreinigungen der Wasserversorgung. Letztere gewähren einen Leistungsanspruch auf Einrichtung von Versorgungssystemen (UN, 2002), beispielsweise Trinkwasserbrunnen und angemessene Abwasserinfrastruktur. Zu den Kernverpflichtungen der Staaten zählen auch die Verabschiedung nationaler Planungsinstrumente wie Strategien oder Plänen, um das Recht zu verwirklichen. Zudem

müssen Indikatoren bestimmt und das Monitoring der Einhaltung der Verpflichtungen gewährleistet werden. Daneben sollen die Staaten auch wasserbezogene Umweltinformationen bereitstellen und Rechtsschutzmöglichkeiten für den Fall der Verletzung des Rechts auf Wasser einführen (UN, 2002). Da die Staaten somit einen ausreichenden Rahmen schaffen und aufrecht erhalten müssen, der die Wahrnehmung des Rechts ermöglicht, hat das Menschenrecht auch eine objektiv-rechtliche Schutzdimension (Kirschner, 2020).

Eine wesentliche Weiterentwicklung des Rechts erfolgte durch den General Comment No. 15 des Ausschusses für wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte aus dem Jahr 2002. Die bis dato eher allgemein gehaltenen Ausführungen zum Inhalt des Rechts werden hierin spezifiziert als Recht auf einen angemessenen und diskriminierungsfreien Zugang zu Wasser für den persönlichen und häuslichen Gebrauch. Dass dieses Recht im UN-Sozialpakt implizit enthalten ist, ergibt sich danach durch eine Auslegung der Art. 11 und 12 des UN-Sozialpakts. Art. 11 garantiert das Recht auf einen angemessenen Lebensstandard, einschließlich u. a. Ernährung, Art. 12 das Recht auf Gesundheit (UN, 2002).

Der General Comment No. 15 ist zwar als Rechtskommentar eines Expertengremiums nicht verbindlich. Die General Comments haben allerdings einen großen Einfluss auf die Staatenpraxis. Außerdem wurde dem General Comment No. 15 nicht widersprochen (Kirschner, 2020). Sein Einfluss zeigt sich insbesondere darin, dass nationale Gerichte sich auf ihn beziehen (High Court of South Africa, 2008) und das Recht auf Wasser nachfolgend in mehreren nationalen Verfassungen eingefügt wurde (Thielbörger, 2014). Auch erkennen mehrere Resolutionen der UN-Generalversammlung ein Menschenrecht auf Wasser an und beziehen sich dafür jeweils auf den General Comment No. 15 (UNGA, 2010; 2013; 2015b). Gleiches gilt für den UN-Menschenrechtsrat (UN, 2010) auf den zudem die Ernennung eines UN-Sonderberichterstatters für den Zugang zu sicherem Trinkwasser und Sanitärversorgung zurückgeht (UN, 2008; UN, 2011).

Weder die Resolutionen des Menschenrechtsrats noch jene der UN-Generalversammlung sind rechtlich verbindlich. Ob ein Menschenrecht auf Wasser im allgemeinen Völkerrecht, also völkergewohnheitsrechtlich und auch außerhalb des UN-Sozialpakts existiert, ist daher umstritten. Dies setzt (1) eine allgemeine Übung in der Staatenpraxis voraus, die (2) von einer entsprechenden Rechtsauffassung getragen ist (Art. 38 Abs. 1 b, IGH-Statut). Der mittlerweile Jahrzehnte andauernde Prozess der normativen Verfestigung kann auf einen wachsenden internationalen Konsens, also das Vorliegen der zweiten Voraussetzung hindeuten. Weniger deutlich ist allerdings das



Vorliegen einer allgemeinen Übung in der Staatenpraxis bezüglich der Existenz eines gewohnheitsrechtlichen Menschenrechts auf Wasser, insbesondere da das Recht tatsächlich oft nicht gewährleistet wird (Kirschner, 2020; Laskowski, 2010; Thielbörger, 2014).

Vor allem Deutschland und Spanien sind seit knapp zwei Jahrzehnten maßgebliche Unterstützer der Anerkennung des Menschenrechts auf Wasser auf völkerrechtlicher Ebene, wobei im deutschen Grundgesetz selbst kein Grundrecht auf Wasser enthalten ist. Auch der WBGU befürwortet die Anerkennung eines allgemeinen Menschenrechts auf Wasser, das nicht lediglich den Zugang zu sauberem Trinkwasser umfasst, sondern auch die Beteiligung der Zivilgesellschaft an wasserrelevanten Entscheidungsprozessen sowie Zugang zu Umweltinformationen und Rechtsschutz. Die Anerkennung sollte zudem klarstellen, dass es sich bei dem Menschenrecht auf Wasser um eine Ausprägung des Menschenrechts auf eine gesunde Umwelt handelt, das ebenfalls noch nicht kodifiziert ist (WBGU, 2023).

Dieses Recht wurde 2022 von der UN-Generalversammlung in einer unverbindlichen Resolution anerkannt, die insbesondere die Aufnahme dieses Menschenrechts in nationale Verfassungen fordert (UNGA, 2022). Dies ist als rechtbasierter Durchsetzungsmechanismus mehr als nur ein Symbol und sollte als Leitbild und Leistungsanspruch verfassungsrechtlich sowie in Menschenrechtskatalogen mit Durchsetzungsmechanismen verankert werden, insbesondere im Grundgesetz und in der EU-Grundrechtecharta. Dadurch könnten materiellrechtliche und prozessuale Lücken geschlossen werden: Materiell wird durch die Anerkennung eines Anspruchs der Belang des Umweltschutzes vermittelt über den Gesundheitsschutz in staatlichen Abwägungsvorgängen gestärkt. Prozessual wird es Individuen über das Menschenrecht auf eine gesunde Umwelt ermöglicht, Umweltrecht prozessual vor Gerichten geltend zu machen und für sich und die Umwelt durchzusetzen (WBGU, 2023).

Bogdandy und Goldmann, 2009). Gleichzeitig sollten für Staaten Anreize zur Mitwirkung an der Internationalen Strategie gesetzt werden. Dazu könnte ein Mechanismus dienen, der wissenschaftliche und technische Expertise aufbereitet, zusätzliche wasserspezifische Kooperationsmöglichkeiten und Finanzierungsoptionen für die Umsetzung der gemeinsamen Ziele bietet sowie gegenseitiges Lernen und neue Netzwerke fördert.

Ein weiterer Vorteil dieses Soft-Law-Ansatzes besteht darin, dass unverbindliche Normen als Wegebreiter und Katalysator für spätere verbindliche Regelungen dienen (Gurreck, 2023). Zudem ermöglicht der unverbindliche Wirkmodus einen höheren Grad an Flexibilität und Reversibilität, so dass im Wege des gegenseitigen Lernens zunächst Regelungen erprobt und gegebenenfalls angepasst werden können (Chinkin, 2000).

Die Internationale Wasserstrategie sollte zunächst die am wenigsten kontroversen Themen aufgreifen, damit eine Identifikation und ein Mitverantwortungsgefühl (ownership) aufgebaut wird. Nachfolgend sollten schrittweise auch konfliktbehaftete Themen behandelt sowie perspektivisch die Verbindlichkeit der unter der Internationalen Wasserstrategie getroffenen Abmachungen erhöht werden. Nach 2030 sollte dieser Prozess in einem rechtlich verbindlicheren Rahmen für die internationale Wassergovernance münden, ähnlich der CBD im Bereich der Biodiversität oder dem Pariser Übereinkommen für Klimaschutz.

Neben den Schnittstellen zu nachhaltiger Entwicklung, Klima, Biodiversität und Landdegradation gibt es auch zahlreiche Diskussions- und Dialogforen zu Wasser innerhalb der Vereinten Nationen, deren Abstimmung und Effektivität jedoch bisher nicht ausreichend ist. Die Akteurslandschaft ist stark fragmentiert: Es gibt über 30 UN-Einrichtungen, deren Mandat auch Wasser umfasst.

UN-Water ist hierbei ein technischer Koordinierungsmechanismus zwischen 35 UN-Institutionen, der der Fragmentierung entgegenwirken soll, dies aber bislang nicht effektiv leisten kann. Daneben unterstützt UN-Water als interinstitutioneller Mechanismus den Prozess der Water Action Decade und das Monitoring von SDG 6.

Die UN-Generalversammlung verabschiedete 2023 eine Resolution, die wichtige Weichenstellungen für die Entwicklung einer besser koordinierten Zusammenarbeit von UN-Einrichtungen im Bereich Wasser enthält (UNGA, 2023). So wurde UN-Water darin mandatiert, in Abstimmung mit den Mitgliedstaaten eine neue „systemweite UN-Strategie für Wasser und sanitäre Versorgung“ zu entwerfen, die integrativ im bisher fragmentierten UN-System wirken soll. Die Strategie wurde im Juli 2024 veröffentlicht (UN, 2024).

8.1.1.5

Institutioneller Rahmen für UN-Wasserkonferenzen

Um die UN-Wassergovernance institutionell zu stärken, empfiehlt der WBGU eine teilweise Neuorganisation: Es sollte ein eigenes Sekretariat auf UN-Ebene gegründet werden, das von einem wissenschaftlichen Expert:innen-gremium unterstützt wird, das Teil einer Water Mapping Initiative ist (Kap. 8.4). Das vorgeschlagene UN-Wassersekretariat sollte die internationalen UN-Wasserkonferenzen (2026, 2028 und folgende) vorbereiten. Hierbei gilt es, wissenschaftlichen Sachverstand aus dem mit Wissenschaftler:innen aus allen Weltregionen und unterschiedlichen Fachdisziplinen besetzten Expert:innengremium einzubeziehen. Eine möglichst diverse Zusammensetzung des wissenschaftlichen Gremiums bietet die Chance, eine zu erarbeitende klimaresiliente Wassergovernance gegenüber den jeweiligen regionalen

Kasten 8.1-2**FAO-Prozess zu Wasserbesitzverhältnissen**

Zu den globalen wasserbezogenen „weichen“ Normen (soft norms) zählt u. a. die FAO-Initiative zu Wasserbesitzverhältnissen (water tenure), die von der deutschen Regierung unterstützt wird. Water tenure wird definiert als „die rechtlich oder gewohnheitsmäßig definierte Beziehung zwischen Menschen als Einzelpersonen oder Gruppen in Bezug auf Wasserressourcen“ (FAO, 2020b: 3) und reagiert darauf, dass über 70 % des Süßwassers weltweit von der Landwirtschaft genutzt werden. Die FAO hat eine praxisbezogene Gemeinschaft zu diesem Thema gegründet. Im Auftrag des FAO-Landwirtschaftsausschusses und des FAO-Rates hat sich die FAO verpflichtet, einen globalen Dialog über Wasserrechte mit den Mitgliedsstaaten sowie Partnern aus Zivilgesellschaft, Wissenschaft und dem Privatsektor zu organisieren (FAO, 2024a). Im FAO-Projekt „Knowing Water Better – KnowWat“ wurden in Pilotprojekten in Sri Lanka, Ruanda und Senegal erfolgreiche Konsultationen zu Wasserbesitzverhältnissen durchgeführt mit Einbeziehung von Interessengruppen verschiedener Sektoren und staatlicher Institutionen (UNESCO, 2023). Als Fortschreibung des Water-Tenure-Konzepts wurden 2012 vom Ausschuss für Welternährungssicherheit die freiwilligen Leitlinien für eine verantwortungsvolle Management von Land-, Fischerei- und Waldbesitz im Rahmen nationaler Ernährungssicherheit verabschiedet (FAO, 2022a). Die freiwilligen Leitlinien für die verantwortungsvolle Verwaltung von Besitzverhältnissen (Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure, VGGT) sind ein internationales Soft-Law-Instrument,

das sich mit den Besitzverhältnissen von Land und natürlichen Ressourcen befasst (FAO, 2020b). Es wird diskutiert diese Leitlinien auch auf Wasserbesitzverhältnisse auszuweiten (Heck et al., 2022). Dies würde einerseits der Frage nach dem Zugang zu Wasser und den regionalspezifischen Verteilungsfragen Rechnung tragen. Andererseits würde es die Untrennbarkeit des Land-Wasser-Nexus aufgreifen. Traditionelle Konzepte zu Eigentumsrechten sind nur bedingt geeignet, die komplexen Zusammenhänge beim Zugang zu und der Nutzung von natürlichen Ressourcen zu verstehen. Dies gilt insbesondere für Wasser, dessen Dynamik durch die Beziehung zwischen Wasser und Land noch komplexer ist (Srigiri et al., o. J.). Zusätzlich gibt es die Idee der Ausweitung der VGGT auf grünes Wasser bzw. Regenwasser und Einbeziehung von Regenwasser als Bestandteil des Wasserbesitzes.

Da die Frage der Wassernutzungsrechte verschiedene SDGs verbindet, hat sie das Potenzial die Umsetzung der Agenda 2030 zu fördern. Dies würde den Schutz vulnerabler Gruppen durch die Verbesserung des Zugangs zu Wasser, die Erhöhung der Wassersicherheit und die Verbesserung der Klimaresilienz verbessern (FAO, 2024a). So sind beispielsweise Wassernutzungsrechte in Bezug auf Ernährungssicherheit ein wichtiges Handlungsfeld (Srigiri et al., o. J.). In dem Zusammenhang spielt auch die Beziehung zwischen formeller und informeller Wasserzuteilung eine Rolle (Kap. 2.4.3), die die Ernährungssicherheit beeinflusst, Ungleichheit verschlimmern könnte und durch den Klimawandel verschärft wird. Die Berücksichtigung von Wasserbesitzverhältnissen könnte die Integration von formellen und informellen Beziehungen z. B. im Rahmen des integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) unterstützen (Kap. 8.2; FAO, 2024a).

und nationalen Akteuren zu kommunizieren und zu vermitteln und dadurch die Mitverantwortung (ownership) für diese zu erhöhen. Zudem könnten die vielfältigen Perspektiven aus unterschiedlichen regionalen und institutionellen Kontexten, mit denen die Expert:innen im Austausch stehen, die Beratung inhaltlich bereichern. Das Sekretariat und das Expert:innengremium könnten auch laufend überprüfen, ob gemeinsam vereinbarte wasserpolitische Ziele, die aus den UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 resultieren, erreicht werden und die hierfür vorgelegten Maßnahmen umgesetzt werden.

Für die Konzeption und Umsetzung dieser zukünftigen internationalen Wassergovernance sollten verstärkt Prognose- und Echtzeitdaten genutzt werden, die sowohl auf Klimamodellierungen und Modellen des Wasserhaushalts als auch auf der Erhebung aktueller Daten von Wasserdargeboten und -bedarfen basieren. Künstliche Intelligenz (KI) und digitale Methoden sollten vermehrt bei der Umsetzung und der Bewertung von beabsichtigten Wirkungen zum Einsatz kommen. Die Nutzung von Big Data und KI muss dabei auf allen Ebenen von Maßnahmen zu Datenschutz, Datensicherheit, Manipulationsfreiheit und informationeller Selbstbestimmung sowie zur Sicherung von Datenqualität begleitet werden. Der Schutz der

Privatsphäre sowie der demokratischen Öffentlichkeit im digitalen Zeitalter sollten sowohl bei der Umsetzung der SDGs systematisch berücksichtigt als auch fest in einem Post-2030-Prozess verankert werden (WBGU, 2019).

Die Intensivierung grenzüberschreitender Zusammenarbeit zur Stärkung der Krisenfestigkeit (Resilienz) ist unverzichtbar. Ein Mangel an sektorübergreifender Koordination in Wasserfragen und operativer Vereinbarungen in der internationalen Zusammenarbeit gefährdet die Erfüllung der Zielvorgaben für Ernährung, Energie, Gesundheit, Klima sowie das Leben an Land und unter Wasser sowie Frieden (UN, 2023c). Deutschland und andere Hoheinkommensländer sollten einkommensschwächere Länder im Wassermanagement unterstützen.

8.1.1.6**Wasserkonventionen stärken: grünes Wasser integrieren, wasserbezogene Konventionen verzahnen und Staaten zum Beitritt animieren**

Die UN-Gewässerkonvention und die UNECE-Wasserkonvention enthalten nachhaltigkeits- und vorsorgeorientierte Zielsetzungen und ein Instrumentarium, das insbesondere auf regionale Kooperation setzt (Kap. 2.4.2.1). Bislang sind diese Konventionen allerdings nur von rund

einem Viertel aller Staaten ratifiziert worden (UN-Gewässerkonvention: 38 Ratifikationen; UNECE-Wasserkonvention: 52 Ratifikationen). Eine Internationale Wasserstrategie, wie vom WBGU vorgeschlagen, könnte weitere Staaten motivieren, den völkerrechtlichen Wasserkonventionen beizutreten, etwa indem eine Plattform zur Klärung der umstrittenen Frage des Verhältnisses der Regeln zur angemessenen und vernünftigen Nutzung auf der einen und dem Schädigungsverbot auf der anderen Seite bereitgestellt wird. Dies könnte dann in der Verabschiedung einer Auslegungsleitlinie für die Konventionen resultieren, in der sich die verschiedenen Interessen wiederfinden.

Was der UN-Gewässerkonvention und der UNECE-Wasserkonvention ferner fehlt, ist neben blauem Wasser auch ein Fokus auf grünes Wasser zu legen. Perspektivisch sollte der Anwendungsbereich erweitert werden um die Regulierung grünen Wassers. Denn auch lokale Eingriffe in den Wasserhaushalt führen zu quantifizierbaren negativen grenzüberschreitenden Veränderungen in Form grundlegender Störungen der Niederschlags- und Verdunstungsmuster. Es bestehen darüber hinaus verschiedene Abhängigkeiten zwischen Staaten und Regionen, weshalb auch zwischenstaatlich gehandelt werden muss. So ist die Verdunstung über Zentralafrika verantwortlich für zwei Drittel der Niederschläge in Nigeria; die Wasserverfügbarkeit Ägyptens ist abhängig von der Nutzung der am oberen Nil gelegenen Anrainerstaaten Sudan, Südsudan, Ägypten und Uganda; Argentinien ist auf den atmosphärischen Wassertransport aus Aufwindgebieten, vor allem in Brasilien, angewiesen (Rockström et al., 2023b: 795; Kap. 2.2.1). Auch über den Handel, insbesondere den internationalen Handel mit Agrarprodukten und den damit verbundenen virtuellen (grünen und blauen) Wasserströmen entstehen Verflechtungen zwischen Ländern und Regionen die Chancen für wasserarme Regionen bieten, jedoch auch Probleme wie Wasserübernutzung verschärfen können (Kap. 2.3.1; 3).

Die Maximen der völkerrechtlichen Grundsätze der angemessenen und vernünftigen Nutzung sowie des Schädigungsverbots – dass die Nutzung einer geteilten Ressource Staaten zu einer Abwägung zwischen den Interessen aller Nutzerstaaten verpflichtet und dass die Nutzung des eigenen Territoriums zu keiner erheblichen Beeinträchtigung fremden Staatsgebiets führen dürfen – lassen sich zwar auf den atmosphärischen Wassertransport anwenden. Jedoch sind die Wirkungszusammenhänge zwischen Landnutzungsänderungen und Niederschlägen wesentlich komplexer als etwa bei grenzüberschreitenden Flüssen. Für eine angemessene Regulierung des Umgangs mit grünem und atmosphärischen Wasser bedarf es daher zunächst weiterer Forschung (te Wierik et al., 2020). Für entsprechende wissenschaftliche Kooperation mit

Blick auf eine nachfolgende angemessene Regulierung kann eine Internationale Wasserstrategie ein Forum für regelmäßigen Austausch bieten. Eine rechtliche Steuerung des Umgangs mit grünem und atmosphärischem Wasser könnten etwa – sobald ausreichendes Wissen vorhanden ist – über Informations-, Konsultations- und Zustimmungspflichten bei Vorhaben wie umfangreichen Landnutzungsänderungen erfolgen, die signifikanten Einfluss auf den grenzüberschreitenden Wassertransport haben (te Wierik et al., 2020). Schließlich bedarf es darüber hinaus einer Verzahnung mit weiteren völkerrechtlichen Verträgen, die zumindest indirekt auch grünes Wasser betreffen, wie z. B. die Biodiversitätskonvention (Abb. 8.1-4). Diese Verzahnungen sollten durch entsprechende Dialogforen verstärkt werden um Widersprüche zu vermeiden und die Kohärenz und Effektivität der Wassergovernance zu erhöhen.

Um der fundamentalen Bedeutung des Wassers für das Leben und die Gesundheit auf dieser Erde Rechnung zu tragen (bzgl. Verfügbarkeit und Qualität), sollte der Schutz der Ressource Wasser als Gegenstand gemeinsamer Sorge der Menschheit (*common concern of humankind*) international anerkannt werden. Dieses Konzept geht von dem Befund aus, dass Schutz und Nutzung der betroffenen Ressource nicht von einzelnen Staaten allein geleistet werden kann, sondern dass es gemeinsamer Anstrengungen bedarf und im gemeinsamen Interesse der Staatengemeinschaft liegt (Cottier et al., 2014: 296). Dies führt weder zum Verlust oder zur Änderung souveräner Rechte der Staaten, noch sind aus ihm verbindliche Rechte und Pflichten ableitbar. Vielmehr dient es als Leitprinzip, fördert Kooperation und begünstigt eine faire Verteilung von Nutzen und Lasten (UNEP, 1991: 254) und kann so die Auslegung von völkerrechtlichen Normen, etwa des Welthandelsrechts, beeinflussen (Strank, 2019: 435).

Insofern kann an die Konventionen im Klima- und Biodiversitätsbereich angeknüpft werden, die den Schutz des Klimas bzw. der Biodiversität als gemeinsame Sorge der Menschheit (*common concern of humankind*) einordnen (UNFCCC, 1. Präambel; CBD, 3. Präambel). Wasserknappheit und -verschmutzung äußern sich wie Biodiversitätsverlust am unmittelbarsten lokal, so dass Schutzmaßnahmen vor allem lokal erfolgen müssen. Im Gegensatz zum Prinzip des gemeinsamen Erbes der Menschheit (etwa „das Gebiet“ im Tiefseebodenregime, Art. 136 SRÜ), ist das Prinzip *common concern of humankind* auf Sachverhalte innerhalb des Territoriums souveräner Staaten anwendbar (Brunnée, 2007: 552 f.), womit eine weitere Parallele zur Biodiversitäts- und zur Klimarahmenkonvention bestünde.

Insgesamt besteht Bedarf an institutionellen Änderungen, nicht nur, um ein langfristiges und kontinuierliches, global repräsentatives Monitoring durch eine internationale Einrichtung zu gewährleisten, sondern auch, um einen langfristigen und kontinuierlichen Rahmen und

zwischenstaatliche Kooperation und Streitschlichtung sicherzustellen. Dessen genaue Ausgestaltung sollte ein Ziel einer Internationalen Wasserstrategie sein. Denkbar ist außerdem ein stärkeres Mandat von UN-Water hin zur Möglichkeit, die programmatische Ausrichtung der UN-Organisationen mitzubestimmen.

8.1.1.7

Berücksichtigung der Internationalen Wasserstrategie in UN-Prozessen und jenseits von UN-Gremien

Nicht nur die Umsetzung der freiwilligen staatlichen Zusagen im Rahmen der Water Action Agenda (UN, 2023b: 21), sondern auch die vorgeschlagene Internationale Wasserstrategie sollte zukünftig beim jährlichen High-Level Political Forum on Sustainable Development und durch weitere Folge- und Review-Prozesse in zwischenstaatlichen, privatwirtschaftlichen und nicht-staatlichen Foren weiterverfolgt werden. Hierbei kann der UN-Sondergesandte für Wasser eine Scharnierfunktion erfüllen und zur notwendigen Integration verschiedener Politikfelder beitragen.

Es sollten allerdings auch Institutionen außerhalb des UN-Systems eingebunden werden, um diese Integration auch mit weiteren internationalen Organisationen bzw. Prozessen zu befördern. Welche Bedeutung kommt etwa dem Umbau von Weltbank, Internationalem Währungsfonds, New Development Bank und Asian Infrastructure Investment Bank zu? Welche Rolle übernehmen die Regionalbanken in der Finanzierung von Wasserpolitiken in ihrer Umsetzung?

8.1.1.8

Politikkohärenz nach innen und außen herstellen

Deutschland und die EU sollten in ihrem internationalen politischen Handeln Politikkohärenz zwischen den verschiedenen externen sowie zwischen den externen und internen Politikfeldern mit Wasserbezug herstellen. Dies ist insbesondere für Europas und Deutschlands Glaubwürdigkeit und internationale Handlungsfähigkeit von großer Bedeutung, die auf den Ausbau von strategischen Allianzen mit Ländern auf allen Kontinenten und aller Einkommensgruppen angewiesen sind. Im Rahmen ihrer internationalen Beziehungen verfolgen Deutschland und die EU eine Vielzahl von Zielen, die zum einen aus internationalen klima- und umweltpolitischen Vereinbarungen resultieren, zum anderen z. B. aus Wirtschaftsinteressen oder geopolitisch strategischen Interessen und Werten bestehen. Politische Maßnahmen zur Förderung dieser Ziele müssen auf Kompatibilität und Kohärenz geprüft werden. Dies kann verschiedenste Bereiche mit Wasserbezug betreffen, z. B. die Sicherung deutscher Energiebedarfe (z. B. Gasförderung im Senegal und Wasserstoffproduktion in Namibia), Agrarsubventionen, die mit dem

Schutz von Wasserressourcen unvereinbar sind, oder auch Auswirkungen von Investitionsabkommen auf eine nachhaltige Wassernutzung und -management. Gerade vor dem Hintergrund geopolitischer Machtverschiebungen rückt die Bedeutung vertrauensvoller Partnerschaften und die Sicherstellung der Glaubwürdigkeit Deutschlands in seinem eigenen politischen Handeln zunehmend ins Zentrum politischer Abwägung. Auch in Vorbereitung der anstehenden Prozesse zur Neuverhandlung einer Post-2030-Agenda ist die Förderung der europäischen und deutschen Glaubwürdigkeit in den Augen strategischer Partnerländer weltweit von zentraler Bedeutung.

8.1.2

Regionale Verantwortungsübernahme und Koordination fördern

Neben der internationalen und staatlichen Verantwortungsübernahme fehlt es vor allem an einer Verantwortungsübernahme und Koordination auf regionaler Ebene (Kasten 8.1-4). Zwar weist die EU mit ihren wasserrechtlichen Instrumenten (Wasserrahmenrichtlinie und Tochterrichtlinien) gute rechtliche Regelwerke auf, es fehlt hier jedoch an einer ausreichenden Umsetzung durch die Mitgliedstaaten. Allerdings kann die EU-Kommission eine fehlende Umsetzung mittels Vertragsverletzungsverfahren vor dem EuGH einklagen.

Die zunehmende Relevanz einer europäischen, klimaresilienten Wasserpolitik ist seit 2023 verstärkt erkennbar. Der Europäische Wirtschafts- und Sozialausschuss (European Economic and Social Committee, EESC) hat 2023 einen Blue Deal vorgeschlagen, indem er mittels 15 Prinzipien auf die Dringlichkeit einer sektorübergreifenden nachhaltigen europäischen Wasserpolitik hinweist (EESC, 2023). Der Vorschlag wurde von Mitgliedern des Europäischen Parlaments aus der „MEP Water Group“ unterstützt (MEP Water Group and EESC, 2023). Die Europäische Kommission kündigte 2024 eine Wasserresilienz-Initiative an, die bislang nur informelle Gespräche zur Folge und bisher nicht zur Entwicklung einer Europäischen Wasserstrategie geführt hat (Canas, 2024; Europäisches Parlament, 2024b). Darüber hinaus sollten bestehende EU-Rechtsakte, wie z. B. der EU-Wasserrahmenrichtlinie und die EU-Kommunalabwasserrichtlinie, die auf den Schutz von Wasserqualität abzielt, effektiv in den Mitgliedstaaten umgesetzt werden (Kap. 7.5.1).

In Regionalorganisationen wie der Afrikanischen Union, ASEAN und MERCOSUR fehlt es an vergleichbaren Koordinationsmechanismen und Instrumenten der Rechtsdurchsetzung gegenüber den Mitgliedstaaten, wie sie charakteristisch für eine supranationale Organisation wie die EU sind.

Institutionell sollte eine internationale Wassergovernance sowohl durch zwischenstaatliche Treffen auf globaler sowie auf regionaler Ebene ausgestaltet werden. Regionale Governanceplattformen haben sich beim Sendai-Abkommen für Katastrophenvorsorge bewährt (Kasten 8.1-3), um regelmäßig die Fortschritte der Umsetzung zu bewerten und sich über Vorgehensweisen und Wissen auszutauschen, z. B. zu Politiken, Programmen oder Investitionen. Ähnlich wie im Bereich Wasser erfordert die Erreichung der Sendai-Ziele die Verbesserung der Umsetzungskapazität und -fähigkeit der Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen, insbesondere der am wenigsten entwickelten Länder (Least Developed Countries, LDCs), kleinen Inselstaaten und der afrikanischen Länder, da diese vor besonderen Herausforderungen stehen. Regionale Plattformen eignen sich gut, regionale Unterschiede herauszuarbeiten. Sie ermöglichen, dass betroffene Staaten selbst regionale Strategien entwickeln, an denen sich Umsetzungsmaßnahmen orientieren.

Als Brücke zwischen den verschiedenen Governanceebenen können multilaterale Kooperationsgemeinschaften dienen (WBGU, 2020: 296). Diese können global wie regional „Koalitionen der Willigen“ zusammenbringen, die sich zu effektiven Lösungen austauschen und gegenseitig unterstützen.

8.1.3

Chancen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen nutzen

Im Sinne des in der vorgeschlagenen Internationalen Wasserstrategie beschriebenen neuen Leitbilds sollte Wasser als Gegenstand gemeinsamer Sorge der Menschheit (*common concern of humankind*) verstanden und in

Wirtschafts- und Handelsbeziehungen entsprechend berücksichtigt werden. Übergeordnetes Ziel sollte sein, die Potenziale für den Schutz von Wasserressourcen, Wachstum und Entwicklung sowie Ernährungssicherung zu nutzen und zu stärken, und negative Effekte wie Verschmutzung und Übernutzung sowie die damit verbundenen Umweltwirkungen zu vermeiden.

Handels- und Wirtschaftsbeziehungen sind Motor für Wachstum und Entwicklung, Beschäftigung und Armutsreduktion (Engel et al., 2021; Europäische Kommission, 2016). Handel kann zur Ernährungssicherheit beitragen (Kap. 2.3.1). Handels- und Wirtschaftsbeziehungen können sich auch auf Umwelt- und Ressourcenschutz positiv auswirken. Die Erfahrung zeigt, dass etwa gehandelte Agrargüter dort produziert werden, wo sie weniger Wasser benötigen, und Handel so global gesehen zu Wassereinsparungen führt (d’Odorico et al., 2019; Kap. 2.3.1). Handel kann national zum Schutz von Umwelt und Ressourcen beitragen, indem er z. B. die Verbreitung von Technologien, Produkten oder Managementpraktiken begünstigt, die effizientere Wassernutzung oder eine Reduktion von Verschmutzung ermöglicht. Zudem kann Handel Anreize für die Übernahme strikterer Umweltstandards setzen, welche wiederum die Entwicklung sauberer Produktionsprozesse und Technologien fördern (OECD, 2019b; WTO, 2023). Handel kann zur Übernahme wassersparender Technologien und so zu einer Verbesserung der Wassernutzungseffizienz und Wassereinsparungen führen (Kagohashi et al., 2015; Dang und Konar, 2018).

Internationaler Handel birgt auch Risiken, z. B. für Ernährungssicherheit sowie für Umwelt- und Ressourcenschutz, einschließlich der Verfügbarkeit und Qualität von Wasserressourcen (Kap. 2.3.1). Die EU importiert z. B. aus den Mercosur-Ländern Argentinien, Brasilien, Paraguay und Uruguay wasserintensive Produkte wie

Kasten 8.1-3

Beispiel für regionale Governanceplattformen: Sendai Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge

Die Erfahrungen des Sendai Rahmenwerks kann der Wasser Community als Vorbild dienen, um die regionale und globale Dimension von Wasser in eine angemessene Governancearchitektur zu übersetzen. Das Sendai Rahmenwerk (2015–2030) wurde 2015 in Sendai in Japan verabschiedet und verfolgt das übergeordnete Ziel, das Ausmaß von Katastrophen und damit verbundene Risiken zu verringern und die staatliche Vorsorge zu verbessern (Sendai Rahmenwerk, Para. 17). Koordiniert wird das Sendai Rahmenwerk durch das United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), welches ein Büro des Sekretariats der Vereinten Nationen ist und durch eine:n Son-

derbeauftragte:n für die Verringerung des Katastrophenrisikos (Special Representative of the United Nations Secretary-General for Disaster Risk Reduction) geleitet wird.

Das Sendai Rahmenwerk baut auf die positiven Erfahrungen mit der Kombination globaler und regionaler Governance-Ebenen auf: Es verfügt über eine globale Plattform sowie regionale Plattformen für Afrika, Nord- und Südamerika, die arabischen Länder, Asien-Pazifik und Europa-Zentralasien (UNDRR, 2024b). Die regionalen zwischenstaatlichen Organisationen sollen hierbei eine wichtige Rolle einnehmen. Die Rolle der EU bei der regionalen Plattform für Europa-Zentralasien zeigt, dass dies gelingen kann (UNDRR, 2024a, Sendai Rahmenwerk, 2019, dt. Fassung, Para. 28c). Regionale Plattformen können als Schnittstelle zu Entwicklungs- und Klimafragen fungieren und die Integration in andere Sektoren zu fördern (Sendai Rahmenwerk 2019, dt. Fassung, Para. 28c).

Kasten 8.1-4**Positivbeispiel Mekong-Vertrag**

Der Mekong-Vertrag zwischen Kambodscha, Laos, Thailand und Vietnam ist ein Positivbeispiel für regionale Zusammenarbeit. Er trat 1995 in Kraft und dient als rechtlicher Rahmen für die Kooperation der Vertragsstaaten zur Erreichung u. a. einer optimalen Nutzung des Mekong wie auch von Umweltschutz, insbesondere der Aufrechterhaltung des ökologischen Gleichgewichts im Flusseinzugsgebiet und der Optimierung von Multifunktionalität. Art. 3 verpflichtet die Vertragsstaaten dazu, die Umwelt, die natürlichen Ressourcen, die Lebensbedingungen im Wasser und das ökologische Gleichgewicht des Flusses vor Verschmutzung oder anderen schädlichen Auswirkungen zu schützen, die sich aus den Entwicklungsplänen und der Nutzung von Wasser und damit verbundenen Ressourcen im Flussbecken ergeben. Aufgrund dieser Regelungen wird der Mekong-Vertrag als progressivster Vertrag zum Management eines grenzüberschreitenden Wasserkörpers angesehen (Bearden, 2010).

Zuständig für die Konkretisierung dieser allgemeinen vertragsstaatlichen Ziele und Verpflichtungen ist die Mekong River Commission (MRC, Art. 11–33), mit einem Rat (Ministerebene), Gemeinsamen Ausschuss (technische Arbeitsebene) und Sekretariat. Dem sich regelmäßig treffenden Rats obliegt es u. a., Pläne zur nachhaltigen Entwicklung des Flusses zu beschließen. Auch die aktuellen Planungsinstrumente des Rates, die Basin Development Strategy 2021–2030 und der diesen konkretisierende Strategic Plan 2021–2025, nennen Umweltschutz und Klimaanpassung als zwei von insgesamt fünf Prioritäten. Die Pläne dienen ausdrücklich auch der Umsetzung der SDGs (MRC, 2021b; 2021–2030). Des Weiteren hat die Mekong River Commission Zustandsberichte zu erstellen und das Monitoring der beschlossenen Maßnahmen durchzuführen.

Das Wasser-Völkerrecht wird bestimmt vom Spannungsverhältnis der beiden zentralen völkerrechtlichen Regeln – der angemessenen und vernünftigen Nutzung der Wasserressourcen sowie dem Verbot, durch diese Nutzung erhebliche Beeinträchtigungen fremden Staatsgebiets zu verursachen (Kap. 2.4.2.1). Die Interessen von Flussober- und Flussunterliegern stehen sich meist diametral gegenüber. In diesem Zusammenhang sieht Art. 5 des Mekong-Vertrags verschiedene Notifizierungs-, Konsultations- und Zustimmungspflichten vor. Nach Art. 7 muss ein Staat alle Anstrengungen unternehmen, um schädliche Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden, zu minimieren und zu mildern, insbesondere auf die Wassermenge und -qualität, das aquatische Ökosystem und das ökologische Gleichgewicht des Flusssystems, die sich aus der Erschließung und Nutzung der Wasserressourcen des Mekong oder der Einleitung von Abwässern ergeben könnten. Zudem ist eine Nutzung sofort einzustellen, wenn ein anderer Staat eine nicht unerhebliche Schädigung eines anderen Staats hinreichend beweisen kann. In diesem Fall sollen die betroffenen Vertragsstaaten den

Sachverhalt aufklären und eventuell erlittene Schäden nach den allgemeinen völkerrechtlichen Regelungen zur Staatenverantwortlichkeit adressieren. Streitbeilegung soll möglichst bereits auf Ebene des gemeinsamen Ausschusses erfolgen, (Art. 34 f.).

Zwar gibt es auch innerhalb der Mekong River Commission mitunter Spannungen, insbesondere im Zusammenhang mit Dämmen und Wasserkraftanlagen, die auch mit den Planungsinstrumenten nicht immer effektiv adressiert werden (Paisley et al., 2016). Die Effektivität der Mekong River Commission wird dadurch gemindert, dass China und Myanmar als Flussoberlieger den Mekong-Vertrag nicht ratifiziert haben (Chakravarty, 2023; Kinna und Rieu-Clarke, 2017). Reformbedürftig ist zudem der Mangel an Beteiligung der lokalen und indigenen Bevölkerungsgruppen.

Trotzdem ist davon auszugehen, dass die Mekong River Commission einen insgesamt positiven Einfluss auf die Governance des Mekong hat, d. h. zu einem integrierten Wasserressourcenmanagement beiträgt, das nachhaltig ist und einen gerechten Interessenausgleich unter den Vertragsstaaten erleichtert. Gründe hierfür sind der funktionierende Datenaustausch, der z. B. die Wasserqualität, die Durchflussmengen und Hochwasservorhersagen betrifft, sowie die nähere Ausgestaltung der Rechte und Pflichten der Vertragsstaaten (Schmeier, 2013). Der Mekong-Vertrag wird daher auch als Vorbild für weitere grenzüberschreitende Flüsse wie den Brahmaputra – der wasserreichste Fluss Asiens – angesehen (Chakravarty, 2023). Hierzu beigetragen hat maßgeblich, dass der Vertrag in Art. 5, 6, 18 und 26 explizit die Konkretisierung von Vertragsnormen durch den Rat und den gemeinsamen Ausschuss delegiert. Dies betrifft die angemessene und vernünftige Nutzung der Wasserressourcen, die Regulierung der Durchflussmengen, inklusive eines Zeitplans für die Trocken- und Regenzeiten, das Monitoring, gemeinsame Aktivitäten und Projekte und den Umweltschutz. Eine dieser Ausgestaltungen ist das Water Utilization Programme, welches vom gemeinsamen Ausschuss entworfen und vom Rat verabschiedet wurde. Es präziserte u. a. die Verfahren für die Notifizierung, Konsultation und Vereinbarung von Vorhaben und schuf einen Rahmen für Entscheidungen der Vertragsstaaten auf der Grundlage genauer wissenschaftlicher und sozioökonomischer Daten, etwa durch Modellierung und gegenseitiges experimentelles Lernen (Paisley et al., 2016). Es gelang zudem, verschiedene Aspekte, wie das Verfahren zum Datenaustausch (MRC, 2001), grenzüberschreitende Umweltverträglichkeitsprüfungen (MRC, 2023) und Wasserqualität (MRC, 2021a) in Leitlinien zu konkretisieren. Diese sind zwar nicht rechtlich verbindlich, leisten aber gleichwohl einen wichtigen Beitrag zur effektiven Kooperation. Zudem befördert die Verzahnung des Sekretariats der Mekong River Commission mit den nationalen Stellen, den National Mekong Committees, die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen in den Vertragsstaaten (Kinna und Rieu-Clarke, 2017).

Futtermittel, Alkohol und Tabak, Gemüse, Soja und Kaffee, aber auch Fleisch und weitere tierische Produkte, mit möglicherweise negativen Spillover-Effekten auf die Wasserressourcen in den Exportländern.

Zu den beschriebenen positiven Effekten kommt es also weder automatisch noch müssen sie für alle Handelsströme gelten. Um die Potenziale von Handel und Wirtschaftsbeziehungen für klimaresilientes Wassermanagement zu heben, ist zum einen eine adäquate Reflexion von Wasserknappheit in ökonomischen Entscheidungen notwendig. Zum anderen ist die Ausgestaltung von Handels- und Wirtschaftsbeziehungen entscheidend.

8.1.3.1

Integration von Wasser in wirtschaftliche Entscheidungen auf internationaler Ebene stärken

Die Integration des Schutzes von Wasserressourcen in wirtschaftliche Entscheidungen ist von hoher Relevanz. Eine Grundvoraussetzung dafür ist, Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten auf Wasserressourcen zu erfassen und wasserbezogene Risiken, z. B. durch Änderung der Wasserverfügbarkeit aufgrund des Klimawandels, für Akteure und Investoren transparent zu machen (Kap. 8.2).

Staaten sollten daher in Anerkennung einer Internationalen Wasserstrategie darauf hinarbeiten, diese Transparenz im Rahmen der unternehmerischen Berichterstattungs- und Offenlegungsverpflichtungen national und international zu stärken und weiterzuentwickeln. Deutschland greift dieses Ziel in der Nationalen Wasserstrategie bereits auf und betont die Notwendigkeit, das Konzept des Wasserfußabdrucks und von Wasserrisiken bei der Herstellung in globalen Lieferketten und beim Konsum von Produkten zu berücksichtigen und zu stärken (BMUV, 2023b). Private und kommunale Unternehmen sollen „auf freiwilliger Basis ihre globalen Produktionsstandorte, Liefer- und Erzeugerketten auf Nachhaltigkeitskriterien, ihren Wasserfußabdruck und Wasserrisiken prüfen sowie Ergebnisse in Nachhaltigkeitsberichten offenlegen“ (BMUV, 2023b: 73 f.). Als konkrete Aktionen zur Umsetzung der Strategie schlägt die deutsche Bundesregierung eine Weiterentwicklung des Konzepts des Wasserfußabdrucks und Prüfung weiterer Konzepte, z. B. der Wasserrisiken, sowie eine stärkere Einbeziehung von Wassernutzung und Wasserrisiken in die EU-Nachhaltigkeitsberichtserstattung vor (BMUV, 2023b, Aktionen 72 und 74). Die Weiterentwicklung des Konzepts Wasserfußabdruck soll mit dem Ziel erfolgen „nationale Ressourcenindikatoren unter Berücksichtigung von Lieferketten zum Wasserfußabdruck abzuleiten und produktbezogene Daten zum Wassereinsatz (differenziert nach grünem/blauem/grauem Wasser oder wasserknappheitsgewichtet) für relevante Produkte und Dienstleistungen als einheitliche Kennzeichnung bereitzustellen“ (BMUV, 2023b, Aktion 72). Umweltkennzeichen, welche

diese Informationen explizit ausweisen, könnten Anreize für einen nachhaltigeren Umgang mit Wasser in Lieferketten setzen.

Der WBGU begrüßt diese Ansätze der Bundesregierung. Wasserbezogene Indikatoren aus Lieferketten können nicht nur Anreize für nachhaltigere Importe und nachhaltigeren Konsum in Deutschland setzen, sondern auch die Exportländer über wasserbezogene Implikationen ihrer Wirtschaftstätigkeit informieren. Die gewonnenen Informationen können zudem mit Daten zu regionalen Wasserknappheiten und für die Zukunft erwartbaren Auswirkungen des Klimawandels kombiniert und explizit genutzt werden, um die Voraussetzungen für ein klimaresilientes Wassermanagement zu schaffen. Lieferkettenbasierte Indikatoren sind zudem eine wichtige Grundlage, um Auswirkungen von Handelsaktivitäten auf andere Länder auch im Wasserkontext (sogenannte Spillover-Effekte) besser zu verstehen und in wirtschaftliche Entscheidungen, beispielsweise über Handelsabkommen, zu integrieren.

Der jährlich erscheinende Sustainable Development Report des Sustainable Development Solutions Network (SDSN) erfasst neben dem Fortschritt bei der Erreichung der SDGs auch internationale Spillover-Effekte, welche die Erreichung der SDGs in anderen Ländern gefährden können. Konkret im Kontext Wasser attestiert der Bericht bei der Vermeidung des Konsums knapper Wasserressourcen über importierte Güter und Dienstleistungen den meisten europäischen Ländern sowie Nordamerika und Australien zum Teil noch große Herausforderungen.

Um zu verhindern, dass es bei der Adressierung von Spillovern durch die Politik oder auch aufgrund von Kosten bei Offenlegungsanforderungen lediglich zu einer Umlenkung von Exporten in Länder mit geringeren Anforderungen kommt, braucht es jedoch entsprechende globale Anstrengungen und möglichst einheitliche Verfahren für Berichtspflichten (Weko und Lahn, 2024). Für die bessere Erfassung von Spillovern und der Umsetzung des Monitoring ist zudem die Kooperation mit und Unterstützung für Exportländer unabdingbar (SDSN, 2023; Kap. 8.3.3.3).

8.1.3.2

Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik an den Zielen der Internationalen Wasserstrategie ausrichten

Internationale Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik sollten nachhaltige Wassernutzung fördern und Wasserknappheit in Regionen unter Wasserstress keinesfalls verschlimmern (GCEW, 2023b). Dieses Leitbild deckt sich oft nicht mit der bisherigen Praxis, in der beispielsweise Agrarsubventionen, die mit dem Schutz von Wasserressourcen unvereinbar sind, zu Verzerrungen internationaler Handelsströme führen. Eine weitere

Herausforderung ist hierbei, dass Auswirkungen von Handels- oder Investitionsabkommen auf Wassernutzung und -management (Spillover) im Rahmen von Handelsabkommen keine Berücksichtigung finden (Kap. 8.2.3.1). Dabei sind grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten für eine bessere Integration wasserbezogener Auswirkungen und Risiken im Rahmen internationaler Handelspolitik denkbar, beispielsweise im Rahmen der Welthandelsorganisation (WTO), von regionalen Handelsabkommen oder auch von Investitionsschutzabkommen.

Welthandelsorganisation

In der Welthandelsorganisation (WTO) ist der Schutz von Umwelt- und Ressourcen derzeit weniger proaktiv, sondern vor allem in den Ausnahmetatbeständen verankert (Art. XX, GATT; Zengerling, 2020). Artikel XX des Allgemeinen Zoll- und Handelsabkommens (GATT) gestattet WTO-Mitgliedern zu, Politiken und Maßnahmen zu ergreifen, auch wenn sie gegen WTO-Grundsätze verstoßen, solange sie notwendig sind zum Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen (Art. XX (b), GATT) und/oder zum Schutz erschöpflicher natürlicher Ressourcen (Art. XX (g), GATT). Länder müssen nachweisen, dass die von ihnen gewählten Maßnahmen in eine der genannten Kategorien fallen und zudem, dass sie nicht derart angewandt werden, dass sie eine willkürliche oder nicht zu rechtfertigende Diskriminierung zwischen Ländern oder eine versteckte Beschränkung des internationalen Handels darstellen. Wasser findet nicht explizit Erwähnung. Für Mitgliedstaaten ist es oft schwer einzuschätzen, ob eine Maßnahme letztlich als regelkonform oder regelwidrig eingestuft werden wird. Diese fehlende Rechtssicherheit kann einen abschreckenden Effekt bei der geplanten Einführung von Maßnahmen haben (Zengerling, 2020). Verschiedene Übereinkommen der WTO erlauben ebenfalls unter bestimmten Bedingungen das Ergreifen von Maßnahmen zum Schutz der Umwelt, z. B. das Übereinkommen zu Technical Barriers to Trade. Eine Auseinandersetzung mit dem Thema Handel und Umwelt auf institutioneller Ebene findet in der WTO zudem über den Ausschuss für Handel und Umwelt (Committee on Trade and Environment) statt. Dieses ist unter anderem für die Verhandlung des Verhältnisses zwischen WTO-Recht und möglicherweise in Widerspruch stehenden Regelungen multilateraler Umweltabkommen wie der CBD zuständig und unterhält Kooperationen mit deren Sekretariaten. Auch kooperiert die WTO mit UNEP (Zengerling, 2020).

WTO-Verhandlungen mit dem Ziel, Hemmnisse für den Handel mit Umweltgütern abzubauen (Environmental Goods Agreement) und so z. B. die Verbreitung von dürreresistenten Feldfrüchten oder Technologien zur Verbesserung der Nutzungseffizienz oder Behandlung von Abwasser zu erleichtern, wurden 2016 unterbrochen und

nicht wieder aufgenommen (Zengerling, 2020). Die seit 2021 stattfindenden „Trade and Environmental Sustainability Structured Discussions“ könnten auf eine verbesserte Integration von Wasser in der WTO hinwirken. Ziel ist die Definition und Koordination von „best practices“ in Umwelt- und Handelspolitiken (Weko und Lahn, 2024), wobei Wasser allerdings keines der Kernthemen darstellt, sondern die Rolle eines Querschnittsthemas einnimmt.

Regionale Handelsabkommen

Regionale Freihandelsabkommen enthalten bezüglich des Umweltschutzes teilweise umfangreichere Regelungen als das WTO-Recht und behandeln dabei auch Themen, zu denen die WTO keine Einigung erzielen konnte oder die in der WTO nicht verhandelt wurden (Zengerling, 2020), so etwa Vereinbarungen zur Förderung des Handels mit Umweltgütern- und Dienstleistungen (z. B. EU-Georgien oder Neuseeland-Taiwan; Morin, 2019) oder die Anwendung umweltbezogener Safeguards (z. B. EFTA, Article 112 (1); Morin, 2019). Allerdings zeigen regionale Umweltabkommen auch die Gefahren, die eine mangelnde Integration wasserbezogener Spillover-Effekte auf beteiligte Ländern haben können, z. B. Auswirkungen des Nordamerikanischen Freihandelsabkommens NAFTA auf die Grundwasservorräte in Teilen Nordmexikos (Gladstone et al., 2021) und Reduktion von Zöllen auf wasserintensive Agrarprodukte im Rahmen des Andean Trade Preference Acts auf Wasserknappheit in Peru (Weko und Lahn, 2024).

Die Trade and Environmental Database des Deutschen Instituts für Entwicklungspolitik und der Universität Laval, Kanada listet etwa 300 verschiedene umweltbezogene Regelungen in 775 Handelsabkommen weltweit (Berger et al., 2017). Die wenigsten haben jedoch expliziten Bezug zur Ressource Wasser und deren Schutz, Nutzung und Management. Auch sind viele Regelungen eher schwach formuliert und ihre Wirksamkeit daher fraglich (Zengerling, 2020).

Investitionsschutzabkommen

Ausländische Direktinvestitionen haben ein hohes Potenzial für die Unterstützung klimaresilienter Entwicklung, etwa durch Investitionen und Wissenstransfer in die Wasserwirtschaft, aber auch im Agrarbereich oder der Städteplanung. Der Versuch, diese Investitionen durch zwischenstaatliche Abkommen und Klauseln in regionalen Handelsabkommen zu schützen, kann allerdings auch das Gegenteil bewirken, wenn beispielsweise Staaten wegen der Durchsetzung von Umweltrecht auf hohe Schadenssummen verklagt werden (Zengerling, 2020). Regelungen zum Umweltschutz wurden erst in jüngerer Zeit in Investitionsschutzabkommen aufgenommen, sind jedoch bisher eher schwach ausgeprägt (Zengerling, 2020). Die Integration von Verpflichtungen für den Schutz von

Wasserressourcen und ein nachhaltiges Wassermanagement auf Seiten der Investoren könnten Direktinvestitionen erhöhen. Aber auch die Rolle des Schiedsgerichts ICSID (International Center for the Settlement of Investment Disputes) bei der Beilegung von Disputen sollte erneut evaluiert werden, insbesondere sein Verhältnis zu nationaler Rechtsprechung. Von etwa 950 erfassten Investor-Staat-Schiedsverfahren vor ICSID und anderen Schiedsgerichten bis Ende 2018 hatten fast 400 einen Umwelt- oder Ressourcenbezug (Zengerling, 2020).

Zusammenfassend erscheint es notwendig, den Schutz von Wasserressourcen in bestehenden Abkommen stärker zu verankern. Dies sollte möglichst unter WTO-Recht geschehen, um kohärente Regelungen für eine möglichst große Gruppe von Ländern zu erreichen, jedoch auch in bi- und multilateralen Abkommen, da eine Reform des WTO-Rechts kurz- und mittelfristig schwierig sein dürfte (Zengerling, 2020; Kap. 8.5.1.3).

8.1.3.3

Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens stärken

Bei der Umsetzung der genannten Maßnahmen (Kap. 8.3.3.1, 8.3.3.2) muss die besondere Situation von Ländern niedrigen und mittleren Einkommens bedacht werden, mit deren sonstigen Wachstums- und Entwicklungszielen der Schutz von Wasserressourcen vereinbar sein sollte. Insgesamt entfielen 2002–2018 nur etwa 4–5 % der Mittel in der Entwicklungszusammenarbeit der OECD-Länder auf den Wassersektor (OECD, 2022a: 43). Durch engere Kooperation zu wasserbezogenen Themen über die Entwicklungszusammenarbeit aber auch subnational und auf Ebene von Unternehmen können Länder niedrigen und mittleren Einkommens darin unterstützt werden, ihre Entwicklungsziele und einen nachhaltigeren Umgang mit Wasser zu erreichen sowie negative Wirkungen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen auf Wasserdargebot und -verfügbarkeit oder -qualität zu vermeiden. Unterstützung ist insbesondere für solche Länder relevant, in denen aufgrund ihrer Vulnerabilität gegenüber Wasserknappheit, -verschmutzung und wasserbezogenen Extremereignissen die Garantie eines Menschenrechts auf Wasser und das Erreichen der Ziele einer Internationalen Wasserstrategie besonders schwierig scheinen. Unterstützung kann nicht nur durch finanzielle Hilfen, sondern insbesondere auch durch Partnerschaften für die Entwicklung und Implementierung neuer Technologien oder zum Aufbau von Kapazitäten geleistet werden. Ziele könnten je nach Kontext etwa eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz in wasserintensiven Wirtschaftszweigen wie der bewässerten Landwirtschaft, z. B. durch geänderte Bewässerungs- und Anbaumethoden, die Vermeidung von Verschmutzung, der Aufbau von Alternativen zu Produkten und Dienstleistungen mit großem

Wasserfußabdruck für den Export oder auch die Stärkung lokaler und regionaler Märkte und Vermarktungssysteme sein. Gleichzeitig sollten Auswirkungen auf Wasserressourcen, etwa beim Ausbau erneuerbarer Energien und der Förderung grünen Wasserstoffs, mitbedacht werden. Es kann sich als sinnvoll erweisen, an bestehende Formate anzuknüpfen und diese weiter zu entwickeln. Dabei bieten sich beispielsweise folgende Formate an:

- Global Water Security and Sanitation Partnership (GWSP) der Weltbank, die unter anderem technische Expertise und Kapazitätsaufbau zur Unterstützung der wasserbezogenen Ziele für nachhaltige Entwicklung fördert.
 - Aid-for-Trade-Initiative der WTO: Deutschland könnte hier Impulse setzen als eines der Länder, die den Großteil der zugesagten EU-Beiträge zu Aid for Trade bereitstellen könnte (Europäische Kommission, 2023a; WTO, 2024).
 - Bi- und multilaterale Kooperation der Entwicklungszusammenarbeit: Bereits heute unterhält das BMZ Klima- und Entwicklungspartnerschaften, z. B. mit Ländern der MENA-Region.
 - Wasserpартnerschaften und Just Water Partnerships: Nach dem Vorbild von Energiepartnerschaften und Just Energy Transition Partnerships könnten Länder unterstützt werden, in denen die Garantie eines Menschenrechts auf Wasser bzw. das Erreichen der Ziele einer internationalen Wasserstrategie besonders schwierig scheint (GCEW, 2023b: 23 f.).
 - Kooperationen anknüpfend an regionale Politiken bzw. Maßnahmen wie die gemeinsame Landwirtschaftspolitik der Afrikanischen Union: Diese sieht die Ausweitung der Flächen unter nachhaltigem Land- und Wassermanagement als eine ihrer Prioritäten.
 - Finanzinstitutionen (z. B. regionale bzw. multilaterale Entwicklungsbanken): Diese können multilateral nachhaltige Wasserregulierung bzw. Verfügbarkeit fördern und diese in Förderinstrumente aufnehmen.
- Für den Aufbau von Wissen und Kapazitäten sowie für die Entwicklung von Technologien ist auch der Ausbau von Kooperation auf subnationaler und Unternehmensebene wichtig. Zentral ist dabei, dass sich die Kooperation für beide Seiten auszahlen sollte. Hierfür gibt es ebenfalls bereits eine Reihe bestehender Initiativen:
- Water-Stewardship-Ansatz des WWF (WWF, 2020): Mit Unterstützung des WWF können Unternehmen Wasserrisiken für ihre Geschäftstätigkeit sowie deren finanzielle Auswirkungen identifizieren und sich Gegenmaßnahmen aufzeigen lassen, welche sie alleine oder mit Partnern vor Ort umsetzen.
 - Global Water Operators' Partnership (GWOPA) der Vereinten Nationen: Ziel ist Betreiber von Wasserinfrastruktur aus Hoch- und Niedrigeinkommens-

ländern zusammenzubringen. Zu den Aktivitäten der GWOPA zählen die Mobilisierung von finanziellen Mitteln, Advocacy, Kapazitätsentwicklung sowie Unterstützung bei Monitoring, Dokumentation und Forschung.

- In Deutschland treibt das Netzwerk der deutschen Wasserwirtschaft (GWP) internationale Partnerschaften zwischen Betreibern, Kammern und Verbänden voran. Es widmet sich aber darüber hinaus auch der Entwicklung von Lösungsstrategien und Best Practice-Beispielen für verschiedene wasserrelevante Themenbereiche weltweit – von landwirtschaftlicher Bewässerung bis hin zu urbaner Resilienz. Dabei strebt GWP die Erschließung neuer Märkte und Verbesserung des Marktzugangs für seine Mitglieder an und bietet diesen so einen Anreiz, dem Netzwerk beizutreten. Die Bundesministerien für Wirtschaft, Entwicklung, Umwelt, Forschung sowie Auswärtiges gehören zu den Gründungsmitgliedern von GWP.
- „Exportinitiative Umweltschutz“: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) fördert seit 2016 deutsche GreenTech-Unternehmen bei der internationalen Verbreitung grüner Innovationen, Produkte und Dienstleistungen, schwerpunktmäßig in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens mit hohem Bedarf an Umwelt- und Ressourceneffizientechnologien und -dienstleistungen (BMUV, 2024). Die Initiative wird beispielsweise auch vom Netzwerk der deutschen Wasserwirtschaft GWP unterstützt.

8.2

Gestaltender Staat und Förderung der Selbstorganisation klimaresilienten Wassermanagements

Das Zusammenspiel zwischen einem gestaltenden Staat und selbstorganisierten Strukturen und Einheiten bietet die Möglichkeit, klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement effektiv umzusetzen (WBGU, 2011). Gemäß dem Subsidiaritätsprinzip gilt es, lokale Organisationen zu unterstützen und auf regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension vorzubereiten. Das folgende Kapitel zeigt anhand unterschiedlicher Beispiele auf, wie dies gelingen kann.

8.2.1

Selbstorganisierte Wassergovernance im Kontext eines gestaltenden Staates

Staaten kommt international und national die Funktion zu, zentraler Hüter von Wasserverfügbarkeit und -qualität zu sein und die öffentliche Daseinsvorsorge zu gewährleisten. Sie sollten der Verpflichtung nachkommen, das Gemeinschaftsgut Wasser ausreichend zu regulieren, u. a. durch Etablierung von Instrumenten, die sich am Vorsorgeprinzip und am Verursacherprinzip orientieren. Beispiele sind die Herstellerverantwortung, die Null-Schadstoffregulierung sowie ein entsprechendes Wassermanagement, das auf die Gesundheit von Mensch, Tier und Ökosystemen abzielt (Kasten 8.2-1).

Wassergovernance und insbesondere seine praktische Umsetzung in Form von klimaresilientem und sozial ausgewogenem Wassermanagement ist immer ein Zusammenspiel von politischer Durchsetzungskraft und praktischem Wassermanagement, abhängig von technischen Infrastrukturen sowie Personal- und Steuerungskapazitäten. Das heißt, Wassergovernance ist immer ein Zusammenspiel von Top-down- und Bottom-up-Governanceansätzen. Werden die Infrastrukturen, Personalkapazitäten und

Kasten 8.2-1

UNECE-Wasserkonvention: Protokoll zu „Wasser und Gesundheit“

Das Protokoll „Water and Health“ der UNECE-Wasserkonvention, das die Vertragsparteien auf Grundlage des Verursacher- und des Vorsorgeprinzips zur Ergreifung von Maßnahmen zur Vermeidung, Kontrolle und Reduktion wasserbezogener Krankheiten verpflichtet, kann hier als Vorbild für die Verknüpfung von Wasser und Gesundheit dienen (UNECE, 1999). Nach dem

Protokoll müssen die Staaten u. a. nationale und lokale Ziele für die Trinkwasserqualität und die Qualität der Einleitungen sowie für die Leistung der Wasserversorgung und der Abwasserbehandlung festlegen. Zudem sollen sie diskriminierungsfreien Zugang zur Trinkwasser- und Sanitärversorgung gewährleisten. Dies stellt auch einen Beitrag zur Gewährung des Menschenrechts auf Wasser (Kasten 8.1-1) dar. Dass das Protokoll bisher von weniger als 30 Staaten ratifiziert wurde, zeigt jedoch auch, dass es zunächst des vorgeschlagenen Soft-Law-Prozesses bedarf (Kap. 8.1.1.4), bevor eine verbindliche Regelung von möglichst vielen Staaten akzeptiert wird.

Umsetzungspotenziale vor Ort nicht vollumfänglich in der Planung von Allokation berücksichtigt, kommt es zu Reibungen im Managementprozess oder zu Fehlallokationen und beispielsweise bestimmte gesellschaftliche Gruppen benachteiligenden Verteilungsmustern, meist auf Kosten der Qualität des Wassermanagements (Kap. 6.1) und somit auch der Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung der Ressource. Das Zusammenspiel von staatlicher und selbstorganisierter Wassergovernance und somit auch eine den gesellschaftlichen, infrastrukturellen und ökologischen Realitäten vor Ort entsprechende Verbindung von Top-down- und Bottom-up-Ansätzen in der Planung und Umsetzung des Wassermanagements ist von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource (Pulido-Velazquez et al., 2022; Girard et al., 2015; Klassen und Evans, 2020; Hornidge et al., 2011).

Die Rolle des Staates sollte hierbei stets die eines gestaltenden Staates sein. Sich auf eine moderierende und nachsorgende Rolle zurückzuziehen, ist für den Staat – so die Argumentation des WBGU – im Bereich der Wassergovernance keine Option. Grund hierfür ist, dass selbstorganisierte nichtstaatliche Akteure ihr Potenzial nur ausschöpfen können, sofern der Staat das Zusammenspiel mit selbstorganisierter Wassergovernance aktiv gestaltet (Kap. 2.4). So kann eine adäquate Einbindung gelebter, teils tradierter Praktiken des Wassermanagements in die formellen Strukturen sichergestellt werden. Gleichzeitig kann aber auch verhindert werden, dass ein Auffangen mangelhafter staatlicher und formalisierter Steuerungsstrukturen im Rahmen von Selbstorganisation dazu beiträgt, dass Reformbedarfe des Staates nicht behoben werden, da sie informell kompensiert werden, und somit „Systeme der Mangelwirtschaft“ (Müller, 2000) weitergetragen werden, statt sukzessive Systemwandel herbeizuführen (Kasten 8.2-2).

Das Beispiel Usbekistans soll veranschaulichen, wie nichtstaatliche Selbstorganisation im Kontext staatlicher und hierarchischer (top-down) Governance aussehen kann. Es zeigt kein Best-Practice-Beispiel, sondern, dass das Zusammenspiel von gestaltendem Staat und Selbstorganisation kontextspezifisch aufgestellt werden muss. Fehlt die Schnittstelle und der Rahmen zwischen den Pflichten und Verantwortungen des gestaltenden Staates und der Dynamik der Selbstorganisation, bleibt letztere vielleicht nur ein Lückenfüller von Staatsaufgaben, oder umgekehrt läuft informelle, nichtstaatlich organisierte Wassergovernance den Zielen des Allgemeinwohls und der gerechten Verteilung entgegen.

Wie auch in anderen Bereichen der Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft spricht sich der WBGU daher auch in der klimaresilienten Wassergovernance für das Leitbild eines gestaltenden Staates aus (WBGU, 2011: 215). Gemeint ist ein Staat, der aktiv, zielgerichtet partizipativ Maßnahmen ergreift, um eine nachhaltige

Entwicklung zu fördern und globale Umweltveränderungen zu bewältigen. Wenngleich Zivilgesellschaft und Unternehmen mitunter zentrale Aufgaben der Wassergovernance übernehmen, insbesondere in Situationen unzureichenden Wassermanagements durch die öffentliche Hand (Kap. 2), muss der Staat seiner Gewährleistungsverantwortung für die Wasser- und Sanitärversorgung sowie den Katastrophenschutz gerecht werden.

Kasten 8.2-2**Wassermanagement in der Landwirtschaft Usbekistans**

Als Teil eines BMBF-finanzierten zehnjährigen Forschungsprojekts in der Förderlinie „Integrated Water Resources Management“ unter Forschung für Nachhaltigkeit wurde über Jahre empirisch dokumentiert, wie Wassernutzer:innen und Landwirt:innen in Zeiten starker Wasserknappheit über rechtlich vorgesehene Wege, ebenso wie über strategisch wirksame, aber entgegen der formellen Institutionen und Vorgaben, den Erhalt von Wasser für ihre Felder sicherstellen.

Die postsowjetisch geprägte Bewässerungslandwirtschaft Zentralasiens ist bis heute durch die Unterteilung in zentral kontrollierte Großbetriebe und individuell geführte kleinbäuerliche Einheiten geprägt. Die weitestgehend nebeneinanderstehenden Produktionssysteme stellen – in der Abgeschlossenheit der sie jeweilig bestimmenden Gesetzmäßigkeiten – zwei in sich fungierende Einheiten im Sinne landwirtschaftlicher Parallelwelten dar (Oberkircher und Hornidge, 2011; Veldwisch, 2008). Während die zentral kontrollierte Großproduktion von Baumwolle, Wein und Weizen vom Staat über landwirtschaftliche Produktionspläne reguliert wird und hohe Erträge erwirtschaftet, unterliegt die kleinbäuerliche Produktion weitestgehend der individuellen Entscheidungs- und Gestaltungskraft (Boboyorov et al., 2009; Herbers, 2006). Beide Produktionssysteme sind jedoch auf Wasser und somit auf eine funktionierende Bewässerungsinfrastruktur und Wassergovernance angewiesen (Tischbein et al., 2013).

Seit historischen Zeiten liefern die beiden Hauptzuflüsse des Aralsees, der Amu Darya und der Syr Darya, das notwendige Wasser zur Entstehung großer Bewässerungslandschaften in ganz Zentralasien. Auf dem Gebiet der ehemaligen zentralasiatischen Sowjetrepubliken wurde die von den Zuflüssen zum Aralsee versorgte Bewässerungsfläche von 4,5 Mio. ha im Jahre 1960 auf 7,6 Mio. ha im Jahre 1990 und 8,1 Mio. ha im Jahre 2004 drastisch ausgedehnt (SIC-ICWC, 2010). Zum Beispiel wird in der Provinz Khorezm, die dieses Wasser direkt nutzt, das Wasser über ein komplexes Netz aus Bewässerungskanälen mit einer Länge von 16.000 km zu den Feldern geleitet. Etwas 275.000 ha sind mit Be- und Entwässerungsinfrastruktur ausgestattet. Etwa 265.000 ha werden hiervon bei ausreichender Wasserverfügbarkeit genutzt (Tischbein et al., 2013). Insgesamt beansprucht die bewässerte Landwirtschaft rund 95 % der Wasserentnahmen.

Die landwirtschaftliche Produktion ist durch das Erbe der Sowjetzeit und die langjährige zentralistische Bewirtschaftung mit ausgedehnten Be- und Entwässerungssystemen abhängig von zentralen Administrationen. Die Bereitstellung von Bewässerungswasser liegt formal im Zuständigkeitsbereich staatlicher Verwaltungshierarchien, die für die Allokation und Verteilung des Wassers aus dem Amu Darya bis zu den Übernahmestellen der Wassernutzerorganisationen (WUAs) zuständig sind. Die Allokation bezeichnet die Bestimmung von Grenzwerten für die Einheiten und Untereinheiten des Bewässerungssystems.

Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung von Bedarfswerten in Abhängigkeit von der Flächengröße, dem Boden und der Grundwassersituation auf der Grundlage statischer Normen. Ausgehend von den Wassernutzern werden diese Bedarfswerte ermittelt und über die Ebenen der WUA, der Sub-Basin Irrigation System Authority (UIS), der Lower Amu Darya Basin Irrigation System Authority (BUIIS) bis auf die Ebene des nationalen Ministeriums für Landwirtschaft und Wasserressourcen (MAWR) aggregiert. Das MAWR legt die Grenzwerte als die den jeweiligen Systemeinheiten zugeordneten Wassermengen in einem zweiten Schritt von der nationalen bis zur WUA-Ebene fest (Martius et al., 2009). Im internationalen Einzugsgebiet des Amu Darya ist es notwendig, die Grenzwerte auf die in der Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (ICWC) vereinbarte Wasseraufteilung zwischen Kasachstan, Kirgistan, Tadschikistan, Turkmenistan und Usbekistan abzustimmen.

In Khorezm kommt es – wie in ganz Usbekistan – zu gravierenden Abweichungen zwischen der offiziellen Wasserallokation und den tatsächlich bereitgestellten Wassermengen, die im realen Bewässerungsbetrieb nicht nur von den Grenzwerten abhängen, sondern unter dem Einfluss vielfältiger Faktoren stehen (Bekchanov et al., 2010; Hornidge et al., 2011). Die Erfüllung individueller Ansprüche unter Nutzung von technischen Hilfsmitteln und sozialen Beziehungen führt zu strategischen Praktiken unter Umgehung des staatlichen Wassermanagements. Zumindest für sozial einflussreiche Akteure wird es somit möglich, die begrenzten personellen, technischen und infrastrukturellen Kapazitäten der formalen Wasserorganisationen wirksam zu kompensieren (Hornidge et al., 2013; Oberkircher und Hornidge, 2011; Veldwisch, 2008). Die Autor:innen argumentieren, dass dieses Überschreiten der staatlich vorgegebenen Regeln sozial ermöglicht wird, indem es diskursiv in die lokal akzeptierten politischen Narrative im Umgang mit natürlichen Ressourcen eingebettet wird.

Dafür kann er selbst als Dienstleister auftreten oder als Regulierer, der Unternehmen oder zivilgesellschaftlichen Organisationen und anderen nichtstaatlichen Institutionen die Wasserversorgung überlässt innerhalb eines rechtlichen Rahmens bei staatlicher Letztverantwortung. Kasten 8.2-3 zeigt am Beispiel von Wassernutzerverbänden in Indien, wie eine solche hybride Governance aussehen kann, bei der der Staat als Regulierer auftritt.

8.2.2**Hybride Governance im Umgang mit verschärften Risiken – nationale Praxisbeispiele**

Das hybride Ineinandergreifen staatlicher und selbstorganisierter Wassergovernance existiert in Hoch-, Mittel- und Niedrigeinkommensländern sowie in allen Gesellschafts- und Regimetypen. Gleichzeitig unterscheiden sich die Grade der staatlichen bzw. selbstorganisierten Governance, abhängig jeweils von der gesellschaftlichen Durchdringung staatlicher Steuerungssysteme. Die im Folgenden genannten Beispiele für existierende hybride Governanceformate zeigen, inwiefern sich staatliche

Kasten 8.2-3**Wassernutzerverbände in Indien**

Ein Beispiel für Wasserbewirtschaftung durch Selbstorganisation bietet das landwirtschaftliche Bewässerungsmanagement in Indien. Dieses lag lange Zeit in zentraler staatlicher Hand und wurde allgemein als ineffizient bewertet. Die Defizite wurden insbesondere in der unzureichenden Einbindung der Landwirt:innen gesehen, weshalb ab den späten 1980er und insbesondere den frühen 2000er Jahren vermehrt ein partizipativer Ansatz verfolgt wurde (Upadhyay, 2006). Hierfür wurde entlang des Konzepts des Integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM; Mollinga et al., 2006; Meran et al., 2021a) die Aufgabe des Bewässerungsmanagements Wassernutzerverbänden, übertragen. Zu ihren Aufgaben zählen in der Regel die Förderung und Sicherung der Verteilung des Wassers unter den Nutzern, die Gewährleistung der Instandhaltung des Bewässerungssystems, die Sicherstellung einer effizienten und sparsamen Wassernutzung zur Optimierung der landwirtschaftlichen Produktion sowie die Gewährleistung des Umweltschutzes und des ökologischen Gleichgewichts, ein Beispiel ist der Andhra Pradesh Farmers' Management of Irrigation Systems Act von 1997; Kap. III. Eine weitere Aufgabe ist die Streitschlichtung zwischen Mitgliedern der Wassernutzerverbände und Weiterbildung im Bereich der Bewässerung.

Die gesetzlichen Grundlagen für die Arbeit der Wassernutzerverbände finden sich in den Gesetzen der einzelnen Bundesstaaten und unterscheiden sich entsprechend von Fall zu Fall. Gleiches gilt für die agrarökologischen und -ökonomischen Bedingungen und gewachsene Strukturen in verschiedenen Teilen Indiens. Die Letztverantwortung für das Wassermanagement liegt stets bei den zuständigen Behörden. Diese können die räumliche Reichweite der Befugnisse der Wassernutzerverbände bestimmen und sie aufteilen oder verbinden (Cullet und Koonan, 2017). Zumindest unmittelbar nach Gründung der Wassernutzerverbände unterstützt der Staat deren Arbeit finanziell.

Eine Stärke dieser Form der Selbstorganisation ist, dass sie unter Einbeziehung der Landwirt:innen geschieht, und somit die Übernahme von Eigenverantwortung für das Bewässerungssystem und Akzeptanz der Managementmaßnahmen gefördert

wird. Insofern kann diese Art der Dezentralisierung des Wassermanagements als Fortschritt bewertet werden gegenüber der zuvor praktizierten zentralen staatlichen Steuerung (Madhav, 2009). Sie hat in Teilen Indiens zu einem effektiveren und effizienteren Bewässerungsmanagement geführt und geholfen, Konflikte um Wasserverteilung zu mindern (Bassi et al., 2010). Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist Vertrauen zwischen den Mitgliedern der Wassernutzerverbänden und deren Führung (Keremane und McKay, 2007).

Andererseits lassen sich verschiedene Defizite in der genauen Ausgestaltung von Wassernutzerverbänden, ihrer institutionellen Prozesskapazitäten, aber auch ihrer infrastrukturellen Ausstattung, beobachten. Hierzu zählen unzureichende Einbindung der Wassernutzerverbände in die Entscheidungsstrukturen der dörflichen Selbstverwaltung (Panchayat Raj) sowie Integration von Verfassungsprinzipien, etwa der Gewährung von Sonderrechten für Angehörige besonders benachteiligter Kasten, sogenannter Scheduled Castes (Cullet und Koonan, 2017). Gleichzeitig führen aber auch die zu geringe Ausstattung mit Transportmitteln (Autos oder Fahrrädern) wiederholt zu einer eingeschränkten Kapazität die Wasserbewirtschaftung in geographisch weitreichenden Bewässerungssystemen praktisch vorzunehmen. Zudem sind Nutzer und Mitglieder der Wassernutzerverbände nur die Landwirtschaft betreibenden Grundeigentümer oder Landpächter. Dies können formalrechtlich zwar auch Frauen sein, jedoch werden sie häufig de facto aufgrund traditioneller Rollenverständnisse nicht als Mitglieder anerkannt (Meinen-Dick und Zwartveen, 1998). Mitunter wurden Fälle von Veruntreuung von Geldern und weiteren Formen möglichen Machtmissbrauchs beobachtet, bedingt durch unzureichende Transparenz- und Rechenschaftspflichten (Madhav, 2009).

Die indischen Wassernutzerverbände illustrieren somit die Ambivalenz, die Formen der Selbstorganisation anhaftet. Sie sind nicht in jedem Fall einer staatlichen Top-down-Regulierung vorzuziehen und ihre Ausgestaltung muss auf die jeweiligen sozioökonomischen Kontexte angepasst sein, um rechtsstaatliche Mindestanforderungen zu gewährleisten (Keremane und McKay, 2007). Bei angemessener Regulierung und eventuell auch staatlicher finanzieller Unterstützung kann Selbstorganisation Effektivität und Effizienz des Wassermanagements sowie dessen Akzeptanz steigern.

und selbstorganisierte Formate gegenseitig ergänzen können. Es handelt sich somit weder um reine Best-Practice-Beispiele noch um einseitig negative Beispiele. Vielmehr sollen hier Einblicke in die kontextspezifische Ausgestaltung der Hybridität gegeben werden. Ein zukünftiges klimaresilientes Wassermanagement bedarf des gesteuerten und geplanten Zusammenspiels des gestaltenden Staates mit all seiner rahmengebender Verantwortung (top-down) sowie der in Teilen schon praktizierten und historisch gewachsenen Selbstorganisation (bottom-up) im Wassermanagement, die nicht aus der Notwendigkeit heraus entsteht, sondern aus der Chance einer verbesserten Wassergovernance, die die Ziele eines klimaresilienten Wassermanagements beschleunigt umsetzen kann.

Bottom-up oder selbstverwaltete Wasserorganisation in Europa – wie auch in vielen anderen Ländern in Asien, Afrika oder den Amerikas – findet häufig in Genossenschaften oder Formen kommunalen Co-Managements statt. Gerade Genossenschaften haben in vielen europäischen Ländern eine lange Tradition und sind dort seit Anfang des 19. Jahrhunderts weit verbreitet (Deane, 2021; Kasten 8.2-4). Wassergenossenschaften in Europa gibt es z. B. in Österreich, Finnland, Dänemark, Deutschland, Irland und Spanien, insbesondere in ländlichen Gebieten. Die Wassergenossenschaften zeichnen sich dadurch aus, dass die Eigentümer gleichzeitig Verantwortliche und Begünstigte der Wasserversorgung und nicht auf Gewinn ausgerichtet sind. Sie basieren auf den Grundsätzen der Gemeinnützigkeit und der solidarischen Zusammenarbeit

Kasten 8.2-4**Formen der Selbstverwaltung von Wassermanagement in Europa**

Österreich ist mit rund 6.000 Genossenschaften das Land mit den meisten Wassergenossenschaften innerhalb der EU (Stand 2024); jährlich kommen ca. 30 Neugründungen hinzu (OÖ Wasser, 2024a). Die Wassergenossenschaft Gramastetten ist ein Beispiel für eine dezentralisierte, demokratisch organisierte Wasserversorgung (Hachfeld et al., 2009). Sie wurde 1947 gegründet und ist mit ihren 728 Mitgliedern eine der größten Wassergenossenschaften Österreichs (Stand: 2023, WGG, 2024). Die Anlage der Genossenschaft speist sich aus 21 Quellen in vier Quellgebieten (OÖ Wasser, 2024b). Die Mitglieder haben Zugang zu allen relevanten Informationen, z. B. zur Wasserqualität oder geplanten Projekten und treffen wichtige Entscheidungen gemeinsam der Mitgliederversammlung. Aufgrund der freiwilligen Arbeit entstehen niedrige Verwaltungskosten, was niedrige Preise für die Wasserversorgung ermöglicht. Die Wasserqualität ist gut und die Tarife niedriger als im Durchschnitt (Hachfeld et al., 2009).

In Finnland gibt es rund 1.500 Wasserkoooperativen, die 13 % der Bevölkerung mit Wasser versorgen. Sie fungieren vor allem in ländlichen, dünn besiedelten Gebieten, die mangels Rentabilität nicht durch die Netze städtischer Unternehmen abgedeckt wurden (Luukkonen, 2013, Pietilä et al., 2020). Die meisten finnischen Wassergenossenschaften sind klein und haben nur wenige aktive Mitglieder. Es gibt jedoch auch eine Reihe größerer, sehr gut organisierter Wassergenossenschaften, die mit kommunalen Versorgungsunternehmen vergleichbar sind (Pietilä et al., 2020). Die Wasserkoooperativen

in Finnland sind sehr divers und abhängig von den lokalen Gegebenheiten und Bedürfnissen unterschiedlich ausgeprägt (Arvonen, 2017). Viele kleine Kooperativen in Finnland stehen vor der Herausforderung, dass aktive Mitglieder altern und ein Generationenwechsel bevorsteht. Hierbei besteht das Risiko, das undokumentierte Wissen verloren geht, z. B. das Wissen der älteren aktiven Mitgliedern über die exakte Position der Leitungsnetzwerke (Pietilä et al., 2020). Kleine finnische Kooperativen haben meist keinen Zugang zu niedrigschwelligen Beratungsangeboten. Die Strukturen in Dänemark sind hier vorbildlich. Die dänischen Wassergenossenschaften haben 2015 einen Verband gegründet, bei dem 15 Expert:innen arbeiten, die die Genossenschaften beraten (Danske Vandværker, 2024; Pietilä et al., 2020).

Während Genossenschaften vor allem in ländlichen Gebieten gegründet wurden, gibt es in Städten positive Erfahrungen mit Organisationsformen wie partizipativem Co-Management. Ein Beispiel ist die Wasserversorgung in Córdoba in Andalusien. Seit 1969 wird die Wasserversorgung in Córdoba von dem öffentlichen Versorgungsunternehmen EMACSA durchgeführt, dessen Leistungen als hochwertig und Preise als niedrig gelten.

Die Struktur von EMACSA ist die eines öffentlichen Betriebs, der vollständig im Besitz der Stadtverwaltung ist. Seit 1979 hat das Unternehmen eine weithin akzeptierte und gut funktionierende Struktur partizipativer Mitverwaltung entwickelt. Unabhängig von den kommunalen Wahlergebnissen nominiert jede Partei zwei Vertreter:innen für den Vorstand. Die beiden großen Gewerkschaftsgruppen nominieren ebenfalls jeweils zwei Vertreter:innen und zivilgesellschaftliche Bewegungen eine Person. Laut Umfragen besteht eine hohe Zufriedenheit mit dem Versorgungsunternehmen (Hachfeld et al., 2009; Di Marco, 2023).

Kasten 8.2-5**Wasser- und Sanitärversorgung in Simbabwe**

In vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens führen traditionelle Geschlechterrollen dazu, dass Frauen weiterhin die Hauptlast von Wasseraktivitäten tragen: Es sind vor allem sie, die Wasser sammeln, transportieren und nutzen. Zudem tragen sie meist die Hauptverantwortung für Gesundheit und Kinderbetreuung, sind für die Wasserversorgung im Haushalt zuständig und fördern häusliche und kommunale Wasser-, Sanitär- und Hygieneversorgung (WASH; Chihanga, 2019). Frauen werden jedoch oftmals daran gehindert, ihre Perspektiven und Interessen politisch einzubringen, z. B. aufgrund fehlender Teilhabe in Entscheidungsgremien.

Das Programm We-Care (Davies, 2017) zum Empowerment von Frauen hat unter anderem auch Veränderungen im Wasserbereich in lokalen Gemeinden untersucht. Ein zentrales Ergebnis war, dass technische Maßnahmen allein nicht genügen, sondern technische Maßnahmen zur Erreichung nachhaltiger Entwicklungsziele Hand in Hand mit sozialen Verbesserungen sowie Beratungs- und Schulungsangeboten gehen sollten. In dem Projekt identifizierten die Frauen dabei vordringlich Maßnahmen, die sie selbst in der Dorfgemeinschaft umsetzen können, wie etwa der Möglichkeit sich als Pumpenwärterinnen ausbilden zu lassen. Viele der einst umfangreich installierten Pumpen in Simbabwe sind defekt. Durch umfangreiche WASH-Programme konnte die Anteil defekter Pumpen von 75 % (von

47.000) auf 30 % reduziert werden (Chihanga, 2019; UNICEF, 2018). Funktionierende Pumpen sind ein wichtiger Zeitgewinn für die Frauen bei täglichen Arbeiten, die besser genutzt werden können und die vor den Unwägbarkeiten und Gefahren beim Wasserholen schützen. Funktionierende Pumpen geben den Frauen mehr Wahlmöglichkeiten bei der Gestaltung ihrer Zeit und mehr Möglichkeiten ihre Rechte einzufordern und sich in sozialen, persönlichen, wirtschaftlichen und politischen Aktivitäten einzubringen.

In den untersuchten Gemeinden zeichnen sich dadurch bereits einige Veränderungen ab: Männer und Jungen beteiligen sich mittlerweile aktiv an den Betreuungsaufgaben der dörflichen Trinkwasser- und Sanitär-Einrichtungen, was als ein erstes Anzeichen dafür gesehen wird, dass sich die sozialen Normen in den Gemeinden ändern. Neuartige Ansätze könnten zum Empowerment von Frauen, aber auch ganzer Dorfgemeinschaften beitragen und gleichzeitig zu einer besseren und nachhaltigeren Umsetzung und Instandhaltung der nötigen Infrastruktur führen. Um die Rolle von Frauen als Pionierinnen des Wandels besser zu verstehen, sollte Verhaltensforschung (z. B. zu Social and Behaviour Change) gefördert werden. Eine andere Studie aus Simbabwe zeigt, dass die Umsetzung von Maßnahmen zu Trinkwasser und sanitäre Versorgung (WASH) in einem Flüchtlingscamp ohne die Beteiligung der Frauen als Hauptakteurinnen, die Erreichung von Zielen in der Umsetzung verfehlen und darüber hinaus weibliche Sanitär- und Schutzbedürfnisse übergangen werden (Sibanda et al., 2023).

(OÖ Wasser, 2024a).

Wassergenossenschaften in Österreich und Finnland beispielsweise zeigen, dass selbstverwaltete Wasserversorgung insbesondere in ländlichen Gebieten gelingen kann (Kasten 8.2-4). In Deutschland ist die Multiakteurs-Plattform der Emschergenossenschaft ein Beispiel für ein gelungenes Wasserressourcenmanagement.

Neben Genossenschaften ist in vielen Ländern selbstorganisierte Wassergovernance in Situationen zu beobachten, in denen die staatlichen Strukturen des Wassermanagements aufgrund unzureichender Umsetzungskapazitäten oder historisch gewachsener gesellschaftlicher Skepsis gegenüber staatlichen Akteuren oder Großunternehmen an ihre Grenzen geraten.

Eines der grundlegenden Probleme in Europa beispielsweise ist die Verschmutzung durch Landwirtschaft, Bergbau und Wohnhäuser, die nicht an ein Abwassersystem angeschlossen sind. Im Jahr 2017 waren etwa 11 % der EU-Bevölkerung nicht an die Abwassersammlung angeschlossen (Grebot et al., 2019). In abgelegenen Regionen und im Landesinneren Europas beispielsweise wird Wasser von Haushalten für den privaten und landwirtschaftlichen Gebrauch aus dem Grundwasser entnommen. In ähnlicher Weise wird auch das Abwasser gesammelt und vor Ort (wie z. B. in einer Güllegrube) entsorgt oder in Flüsse geleitet (Grebot et al., 2019). In Spanien, wo Oberflächenwasser in Flusseinzugsgebieten übermäßig zugeteilt wird, sind die Grundwasserressourcen in vielen wasserarmen Regionen überbeansprucht. Zur Behebung des Wassermangels wurden mit dem Gesetz 46/1999 Wassermärkte in das spanische Recht eingeführt, die den Landwirt:innen den Austausch von öffentlichem Wasser und den Abschluss von Handelsvereinbarungen gestatteten. Diese beiden Mechanismen wurden sporadisch genutzt, insbesondere in Dürrezeiten (De Stefano et al., 2016).

Aktuelle Forschung zu gesellschaftlich-technischen Innovationen in urbanen Räumen in Niedrig- und Mitteleinkommensländern deutet darauf hin, dass ein universeller Zugang zu Trinkwasser und Abwasserentsorgung weniger durch zentrale, großskalige Infrastruktur, sondern vielmehr durch kleinskalige, selbstorganisierte Wasserversorgung erreicht werden kann (Blomkvist et al., 2020: 1). Am Beispiel von Nairobi wird deutlich, dass das formelle städtische Wasserversorgungssystem zunehmend Praktiken für Wasserversorgung in informellen Siedlungen berücksichtigt. Wassernutzer:innen werden durch adaptive Innovationen, wie Verkaufsautomaten für Wasser, erreicht und nicht – wie in herkömmlicher Weise – durch vertikale Integration und Ausbreitung des offiziellen Wassersystems (Blomkvist et al., 2020: 10). Staatliche und selbstorganisierte Wasserinfrastrukturen und -praktiken ergänzen sich hier gegenseitig. In Daressalam in Tansania ersetzen lokale Praktiken der

Wasserversorgung in Siedlungen am Stadtrand das zentrale, dysfunktionale Wassersystem – in der Praxis gibt es auch hier keine klare Trennschärfe zwischen beiden Systemen (Dakyaga et al., 2021: 112). Eine Studie zu Wasser- und Sanitärversorgung in Simbabwe (Kasten 8.2-5) zeigt weiter, wie die über die Einbindung der Gesellschaft in die Planung und Ausgestaltung der Wasserinfrastruktur die soziale Einbettung dieser und somit auch nachhaltige Nutzung und Pflege ermöglichen kann.

Vor dem Hintergrund wasserbezogener Verschärfungen (Kap. 3) mit negativen Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit und -verteilung nimmt die Notwendigkeit staatliche und selbstorganisierte Wassergovernance gezielt zusammenzudenken signifikant zu. Die dringend notwendige und beschleunigte Umsetzung einer vorausschauenden und nachhaltigen Wassergovernance ist somit als ein gezieltes und bottom-up wie auch top-down gefördertes hybrides Zusammenwirken von staatlicher und selbstorganisierter Wassergovernance zu verstehen. Geleitet vom Leitbild eines gestaltenden Staates setzt sich der WBGU für eine gezielte Förderung des systemischen Ineinandergreifens beider Governanceformen ein. Dies kann insbesondere auch in der finanziellen Förderung der Selbstorganisationseinheiten durch Staaten bestehen. Der WBGU spricht hier von hybrider Umsetzungsgovernance für klimaresilientes Wassermanagement (Kap. 7).

Als Instrument, um eine erfolgreiche hybride Governance zu gestalten, werden im folgenden Kapitel Dialogforen mit deliberativen Elementen vorgeschlagen (Kasten 8.2-6). Anschließend werden Empfehlungen hinsichtlich wissenschaftlich informierter Dialogforen auf allen Ebenen ausgesprochen.

8.2.3

Dialogforen mit deliberativen Elementen als Instrumente hybrider, klimaresilienter Wassergovernance

Bezüglich der globalen Wasserkrise und möglicher Anpassungsoptionen bedarf es eines wissenschaftlich informierten, inklusiven Diskurses zu den Grenzen der Beherrschbarkeit angesichts regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension (Kap. 4). Partizipative Dialogplattformen bzw. eine Struktur von Foren auf multiplen Ebenen können den Rahmen für einen solchen Diskurs ermöglichen. Dies erfordert sowohl den Einbezug von fachlicher und wissenschaftlicher Expertise, dem Wissen der Verwaltung sowie die Integration der gesellschaftlichen Perspektivenvielfalt und multiplen Lebenswelten. Die Foren sollten möglichst inklusiv und ausgeglichen zusammengesetzt sein.

Die Erfahrungen des zweijährigen Wasserdialogs im Vorfeld der deutschen Wasserstrategie können als Vorbild

Tabelle 8.2-1

Dialogforen zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension. Vorschlag für die Konzeption von Dialogforen zum Umgang mit Wassernotlagen und möglicher Grenzen der Beherrschbarkeit auf verschiedenen Ebenen.
Quelle: WBGU

Ebene	Fokus	Fragestellung	Akteure
Lokale Ebene, Städte, Kommunen, Landkreise	Diskussion von Optionen der Umsetzung	Was bedeuten Grenzen der Beherrschbarkeit für unsere Landschaft, unser Dorf oder unsere Stadt?	> Wissenschaft > Landwirt:innen > Zufällig ausgewählte Bürger:innen > Naturschutz > Industrie > Versorger
Substaatliche Ebene	Diskussion von Optionen für (Bau-) Planung von Infrastruk- tur und Anpassungs- strategien	Was bedeuten Grenzen der Beherrschbarkeit für unser Bundesland?	> Wissenschaft > Verwaltung > Kommunen > Verbände > Zufällig ausgewählte Bürger:innen
Staatliche Ebene	Diskussion zu Op- tionen der Anpassungs- strategien sowie möglichen Reformen und Finanzierung	Was bedeuten Grenzen der Beherrschbarkeit für unser Land?	> Wissenschaft > Verwaltung > Kommunen > Verbände > Zufällig ausgewählte Bürger:innen
Regionale Ebene	Diskussion zu Optionen für Vorsorge, Katastrophenschutz und Frühwarnsysteme	Was bedeuten Grenzen der Beherrschbarkeit für unsere Weltregion?	> Wissenschaft > Delegierte aus EU/Asien/ Nordafrika/Nord- und Südamerika usw.
Globale Ebene	Diskussion möglichst aller Staaten zu globalen Anpassungszielen und Anpassungsfinanzierung sowie IWRM	Was bedeuten Grenzen der Beherrschbarkeit für unsere Welt?	> Wissenschaft > Delegierte aus staatlichen und regionalen Foren > Wissenschaft > SDG Akteure > UNFCCC Akteure > CBD Akteure > UNCCD Akteure

dienen. In strukturierten Diskussionsforen diskutierten hierbei Akteure aus der Wasserwirtschaft und anderer Sektoren, um gemeinsam die Herausforderungen und strategische Ziele zu formulieren und erste Lösungsideen zu entwickeln (Fleischmann und Dworak, 2022). Zudem wurden zufällig ausgewählte Bürger:innen aus verschiedenen Regionen Deutschlands beteiligt, deren Empfehlungen in der Nationalen Wasserstrategie aufgegriffen wurden (BMUV, 2023b: 6). Die Evaluation

des Wasserdialogs schlägt für zukünftige Dialogprozesse einen mehrstufigen Prozess vor. Zunächst könnten kleine, stark fachlich ausgerichtete Gruppen Aktivitäten und Herausforderungen in Bereich Wasser erläutern und inhaltlich vorbereiten. Ein zweiter Teil könnte aus einer Vielzahl inklusiver Foren bestehen, in denen diese Vorschläge breit diskutiert werden (Fleischmann und Dworak, 2022: 46). Hierbei könnten ausgewählte Akteure und zufällig ausgewählte Bürger:innen teilnehmen. Vertreter:innen

Kasten 8.2-6**Bürgerbeteiligung und die Förderung von Selbstorganisation**

Eine demokratische Beteiligungskultur, sowohl mittels Parteien und gewählten Repräsentant:innen als auch durch innovative, inklusive Dialogprozesse sind grundlegend für die Tragfähigkeit von politischem Wandel. Partizipation reduziert das Konfliktpotenzial zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen und entschärft dadurch Nutzungskonflikte, die z. B. bei Wasserknappheit auftreten können (Kittikhoun und Staubli, 2018; Markowska et al., 2020). Die wasserspezifischen Dialoge sollten verständigungsorientierte, möglichst gleichberechtigte Diskussionen ermöglichen, und die Entscheidungsfindung und Selbstorganisation unterstützen. Je unterschiedlicher die Lebenswelten und Perspektiven der Beteiligten sind, desto höher ist das Verständigungs- und Lernpotenzial. Die Dialoge sollten wissenschaftlich informiert sein und können durch direkten Austausch zwischen Wissenschaftler:innen und Bürger:innen soziales Lernen in beide Richtungen ermöglichen (Blum, 2024).

Eine gelungene Deliberation führt bei einer Mehrheit der Teilnehmenden zur Erfahrung einer politischen Selbstwirksamkeit. Das argumentative Einbringen von erfahrungsbasierten Einstellungen und Wertvorstellungen erlaubt es ethische Aspekte in die Diskussion einzubeziehen. Ein stärkeres Bewusstsein für Wasser als Ressource kann sich hier durch deliberative Dialogforen und einen öffentlichen Diskurs entwickeln (Große Hüttmann, 2020; Habermas, 1992), wodurch ein öffentlicher Diskurs über eine neue Wasserethik angestoßen werden könnte (Gerten, 2018; Kowarsch, 2012; Meisch, 2019).

Eine Stärke der Deliberation ist ihre Flexibilität. Beteiligungsverfahren können je nach Bedarf an die unterschiedlichsten Fragestellungen und Kontexte angepasst werden (Blum et al., 2022). Je nach regionaler Problemlage und Ausgangsfrage können entweder nicht betroffene interessierte Bürger:innen oder betroffene Akteure, wie z. B. unterschiedliche Wassernutzer:innen, zu einem Dialogforum eingeladen werden. Auch gemischte Verfahren mit zufällig ausgewählten Personen und organisierten Akteuren sind möglich, wie das Beispiel der kommunalen Entwicklungsbeiräte zeigt (Pannke et al., 2024). Dialogorientierte Beteiligung unterscheidet sich von einer klassischen Stakeholder-Beteiligung dadurch, dass sie einer verständigungsorientierten statt einer interessensgeleiteten Logik folgt. Die vorgetragenen Argumente werden meist in moderierten Kleingruppen während mehrerer Workshops durch die Teilnehmenden entwickelt und im weiteren Verlauf zu Empfehlungen gemeinsam weiterentwickelt. Die Dialogforen haben eine beratende Funktion gegenüber Verwaltung und Politik. Es bedarf zu Beginn einer Beteiligung Klarheit darüber, wie die Ergebnisse im weiteren Verlauf verwendet werden.

Dialogorientierte Partizipationsprozesse können unterschiedlich ausgerichtet sein. Sowohl in der Zusammensetzung der Beteiligten, die meist in iterativen Prozessen, einen für alle gangbaren Weg suchen. Dabei können Bürger:innen kleiner, z. T. informeller Siedlungen, in Workshops Lösungen erarbeiten, die direkt vor Ort umgesetzt werden können, wie das Beispiel der Verbesserung der Trinkwasser- und Sanitär situation in

Simbabwe zeigt (Chihanga, 2019). Zudem können auch Interessen- und Kommunalverbände mit einbezogen werden, wie die Beispiele aus Brandenburg und Schleswig-Holstein zeigen.

Partizipative Verfahren durch ehrenamtliche Arbeitsgruppen in Schleswig-Holstein im Rahmen der Europäischen Wasser Rahmenrichtlinie sind ein gutes Beispiel dafür, wie organisierte Akteure mit unterschiedlichen Perspektiven in einen Dialog treten können. Das Beispiel illustriert dabei auch, dass immer wieder bisher Machtasymmetrien und Zielkonflikte im Wasserbereich auftreten, diese sollten besser verstanden und erforscht werden. Eine aktive Rolle z. B. als „Hüter:innen von grünem Wasser, Gewässern und Grundwasser“ (Blackstock et al., 2010; McGonigle et al., 2012), könnte sie zu Botschafter:innen und aktiven Akteuren einer Wasserwende machen, die sich sowohl volkswirtschaftlich als auch ökologisch auszahlt.

In Artikel 14 fordert die europäische Wasserrahmenrichtlinie die Mitgliedsstaaten auf, die aktive Beteiligung der Öffentlichkeit bereits im Planungsprozess zu fördern. Die Mitgliedstaaten müssen aber dafür sorgen, dass für die Flussgebietseinheiten umfassende Informationen öffentlich bereitgestellt werden und jedem die Möglichkeit zur Stellungnahme gewährt wird. Das heißt nicht, dass die Möglichkeit der aktiven Beteiligung mit einer Stellungnahme bereits erschöpft sein muss.

In einem Bericht des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) über den partizipativen Prozess in Schleswig-Holstein wird skizziert, wie alle getroffenen Entscheidungen der Arbeitsgruppen im Konsens getroffen und somit von allen Stimmberechtigten mitgetragen wurden (Petersen und Klauer, 2014). „Von den Beteiligten wurde es als wesentlich erachtet, dass in den Arbeitsgruppen eine Atmosphäre der gegenseitigen Achtung und des Vertrauens herrschte“ (Petersen und Klauer, 2014: 12). Das zuständige Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume behielt sich aber vor, eigenständig eine Entscheidung zu treffen, wenn keine tragfähige Lösung oder Konsens gefunden werden konnte, hatte aber während des Prozesses selbst kein Stimmrecht. Die Empfehlungen der Arbeitsgruppen wurden von den Ministerien dann auch in der Regel unverändert umgesetzt (Petersen und Klauer, 2014). Die Arbeitsgruppen, bestehend aus Vertreter:innen regionaler Behörden, Körperschaften und Verbänden, hatten sich bereits im Vorfeld zur Bestandsaufnahme zusammengefunden, um den Status Quo der Gewässer vor Ergreifung der Maßnahmen zu erfassen. Laut Bericht des UFZ wurde damit schon ein frühzeitiges Kennenlernen der Gewässer, der EU-Richtlinie sowie das persönliche Kennenlernen der weiteren Akteure initiiert. Durch den Anreiz der Leitung der Arbeitsgruppen gelang es in Schleswig-Holstein, die Wasser- und Bodenverbände aktiv in die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zu involvieren und sie auf Einhaltung der vereinbarten Ziele zu verpflichten. Dies ist insofern als Erfolg zu werten, da die Wasser- und Bodenverbände hauptsächlich wirtschaftliche Interessen verfolgen, wie die Entwässerung landwirtschaftlicher Flächen. Allerdings betont der UFZ-Bericht auch, dass es dadurch zu einer Abwertung der Ziele des Europäischen Wasserrahmenrichtlinie kam. Dies sei häufig bei Partizipationsprozessen zu beobachten: Kompromisse aufgrund unterschiedlicher Interessen führen oftmals zu einer Minderung der Umweltvorgaben bis hin zum Minimalkonsens.

der jungen Generation, die zukünftig besonders stark von regionalen Wassernotlagen betroffen sein werden, könnten verstärkt eingeladen werden (BMUV, 2024).

Sinnvoll wäre die auf nationaler Ebene geführten Dialoge über eine Schnittstelle mit den regionalen Governanceplattformen zu verknüpfen (Kap. 8.1.2). Gewählte Delegierte der Foren könnten hierbei ihre Erfahrungen einbringen, sich austauschen und gemeinsame Positionen entwickeln.

Als Instrument einer nachhaltigen hybriden Governance könnten wissenschaftlich informierte Dialogforen auf allen Ebenen etabliert werden (Tab. 8.2-1). Um auf die planetare Dimension regionaler Wassernotlagen (Kap. 4) aufmerksam zu machen, sollte die Thematik und Ausarbeitung von (Wasser-)Anpassungsmaßnahmen auf nationale, regionale und internationale Agenda gebracht werden. Dialogforen mit deliberativen Elementen auf allen Ebenen sollten institutionell aufgebaut und miteinander verknüpft werden. Verschiedene Akteure aus allen gesellschaftlichen Bereichen können dadurch motiviert und aktiviert werden, zur Lösungssuche und effektiven Umsetzung aktiv und kontextbezogen beizutragen.

Auf zwischenstaatlicher regionaler Ebene gibt es bereits die G20-Dialoge zu nachhaltigem und resilientem Wassermanagement, die einen Erfahrungsaustausch zwischen Ländern ermöglichen (G20 Water Platform, 2024).

Die Erfolge im nachhaltigen, integrierten, klimaresilienten und sozial ausgewogenen Wassermanagement der vergangenen Jahrzehnte – teils geleitet vom Konzept des Integrierten Wasser Ressourcenmanagements (IWRM), des Water-Food-Energy-Nexus bzw. polyzentrischer Wassergovernance-Ansätze (Kap. 2), teils von der Agenda 2030 und dem jüngst aufgesetzten UN-Wasserprozess – weisen wiederholt darauf hin: nachhaltiges und den heutigen, sich gegenseitig verschärfenden Herausforderungen von Klimawandel und geopolitischen Machtverschiebungen, von sozialen Ungleichheiten und großer Finanzknappheit (etwa Schuldenkrisen) geprägt, entsprechendes Wassermanagement bedarf des engen Zusammenspiels, Koordination und Abstimmung von Top-down- und Bottom-up-Wassergovernance. Dies bedeutet auch von staatlicher Wassergovernance und gelebter, aber eben auch explizit geförderter Selbstorganisation des Wassermanagements. Wie dieses Ineinandergreifen der verschiedenen Ansätze in unterschiedlichen Weltregionen und gesellschaftspolitischen Kontexten genau aussieht, variiert stark (Kap. 4; Kästen 8.2-2–8.2.5). Regierungen, Zivilgesellschaften und Privatwirtschaft sind gefordert in enger Abstimmung Umsetzungsgovernance zu gestalten, also im hybriden Zusammenwirken von staatlicher Steuerung und praktischem, alltäglichem Wassermanagement den verschärften Herausforderungen im Wassersektor entgegenzutreten. Hierbei sollten sie von dem Ziel geleitet sein klimaresilientes und sozialausgewogenes

Wassermanagement sicherzustellen.

8.3

Finanzierung für lokale Ansätze mobilisieren und vermitteln

Der Schutz von Wasserressourcen, resiliente Wasserinfrastrukturen und sichere Wasser- und Sanitärversorgung brauchen weltweit mehr und effektivere Investitionen, um (weitaus höhere) positive Effekte wie vermiedene Schäden, bessere Gesundheit und wirtschaftliche Entwicklung sowie höhere Umweltqualität zu erzielen. Während die öffentliche Hand weiterhin die entscheidende Rolle spielt, sollte auch privates Kapital stärker mobilisiert werden. Hierfür ist neben einem Aufbau von Fähigkeiten und Kapazitäten vor allem bei öffentlichen Unternehmen und Regulierern eine stärkere Transparenz wasserbezogener Risiken in Finanzmärkten, eine Stabilisierung der Einnahmenquellen im Wassersektor und für wasserbezogene Projekte sowie eine bessere Vermittlung zwischen Wasser- und Finanzakteuren notwendig.

Der Investitionsbedarf auch aufgrund sozioökonomischer Trends und des Klimawandels wird bis 2030 bzw. 2050 auf 6.700 bzw. 22.600 Mrd. US-\$ geschätzt (Khemka et al., 2023, beruhend auf breit streuenden Schätzungen: WWC und OECD, 2015). Zwar stieg 2000–2022 der Anteil der Weltbevölkerung mit sicherem Zugang zu Trinkwasser von 61 % auf 73 % und für sichere Sanitäreinrichtungen von 32 % auf 57 % (UN Water, 2024), aber auch heute müssen noch 2,2 bzw. 3,5 Mrd. Menschen darauf verzichten (UNESCO, 2024). Im Jahr 2016 wurde geschätzt, dass in 140 Ländern mit niedrigem Angebot an WASH-Dienstleistungen eine Verdreifachung der damaligen jährlichen Investitionen auf dann 114 Mrd. US-\$ nötig wäre, um SDGs 6.1 und 6.2 bis 2030 zu erreichen (Hutton und Varughese, 2016). Wasserbezogene Investitionen kommen hauptsächlich von der öffentlichen Hand (Alaerts, 2019). Die globalen öffentlichen Entwicklungsleistungen (Official Development Assistance, ODA) für den Wassersektor lagen 2022 mit 9,1 Mrd. US-\$ mehr als 4 % unter ihrem Maximum von 2018 (UN Water, 2024). Private Akteure investieren im Vergleich zu anderen Infrastruktursektoren wenig im Wassersektor (Alaerts, 2019), auch aufgrund der als gering wahrgenommenen Kreditwürdigkeit und geringen Effizienz von Wasserversorgern (Khemka et al., 2023; Kap. 2.5.1). Dies gilt nochmals verstärkt in Niedrigeinkommensländern, in denen z. B. der Anteil des Bereichs Wasser und Abwasser an den mit öffentlichen Entwicklungsleistungen (ODA) gehebelten privaten Finanzmitteln zwischen 2012 und 2017 bei nur 1,4 % lag (verglichen mit z. B. 26 % im Energiesektor und 29 % für Bank- und Finanzdienstleistungen; OECD, 2019a). Auch

bei naturbasierten Ansätzen ist der öffentliche Anteil besonders hoch, sie machten z. B. 2017 in Europa 99 % aller Investitionen in den Schutz von Wassereinzugsgebieten aus (Bennett et al., 2017). In Deutschland werden einige wichtige Aktionen der Nationalen Wasserstrategie, etwa das geplante Förderprogramm „Klimabezogene Maßnahmen in der Wasserwirtschaft und Gewässerentwicklung“, aus dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) finanziert (BMUV, 2023a). Dies ist eine von über 20 mit Fördermitteln verbundenen Maßnahmen des ANK, das 2023–2026 läuft und nach Haushaltskürzungen mit 3,5 Mrd. € ausgestattet ist (NABU, 2024). In einem früheren Entwurf der Wasserstrategie war noch ein eigenes „Sofortprogramm für Gewässerentwicklung und Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel“ mit einem Volumen von 1 Mrd. € über zehn Jahre vorgesehen (BMU, 2021).

Dabei lohnen sich diese Investitionen der grundlegenden Daseinsvorsorge mehrfach: Durch bessere Gesundheit, Bildungsmöglichkeiten und höhere Beschäftigung liegt das Nutzen-Kosten-Verhältnis im globalen Durchschnitt bei 3,4 bzw. 6,8 für Trinkwasserversorgung in städtischen bzw. ländlichen Räumen, und bei 2,5 bzw. 5,2 für grundlegende Sanitärversorgung (UNESCO, 2024). Im Jahr 2019 hätten durch sichere Trinkwasser- und Sanitärversorgung und Hygiene weltweit 1,4 Mio. Todesfälle durch Durchfall-, Atemwegs- und Wurmerkrankungen sowie Unterernährung verhindert werden können (Wolf et al., 2023). Zum Beispiel wird Cholera über Wasser übertragen und breitet sich besonders unter schlechten hygienischen Bedingungen aus, die in Dürreperioden weiter verschärft werden. Das World Economic Forum (WEF, 2024) schätzt die Kosten für die globalen Gesundheitssysteme allein durch Cholera 2023–2050 auf 51 Mrd. US-\$. Bei der Vermeidung wasserbezogener Risiken des Klimawandels stünden Investitionen in Frühwarnsysteme, klimaresiliente Infrastrukturen, Trockenfelddbau, Mangrovenschutz und resilienteres Wasserressourcenmanagement in Höhe von 1.800 Mrd. US-\$ bis 2030 Nutzen von 7.100 Mrd. US-\$ u. a. in Form von vermiedenen Schäden,

Produktivitätsgewinnen, sozialen Nutzen und Ökosystemleistungen gegenüber, ein Verhältnis von 1:3,9 (GCA, 2019). Naturbasierte Lösungen wie die Renaturierung von Feuchtgebieten weisen oft niedrigeren Investitionsbedarf auf als technische Lösungen, erfordern aber regelmäßige Instandhaltung und entsprechende Fähigkeiten (Caretta et al., 2022: 652). In Niedrigeinkommensländern könnten Frühwarnsysteme für 800 Mio. US-\$ Schäden von 3–16 Mrd. US-\$ pro Jahr vermeiden; schon eine Vorwarnzeit von nur 24 Stunden vor einem Ereignis könnte die Folgeschäden um 30 % reduzieren (UN Water, 2023).

Um die Investitionslücke zu schließen, legen viele Strategien einen Schwerpunkt auf die Kombination staatlicher und privater Ansätze, etwa die Strategie der Weltbank für eine Skalierung der Investitionen im Wasserbereich (Khemka et al., 2023). Auch für das aktuelle Reformprogramm der Weltbank insgesamt ist als ein Eckpunkt eine stärkere Zusammenarbeit mit dem Privatsektor vorgesehen, um Investitionen für nachhaltige Entwicklung zu mobilisieren (BMZ, 2024). Dies entspricht der Linie, die auch die Aktionsagenda von Addis Abeba zur Entwicklungsfinanzierung (UNGA, 2015a) vorgezeichnet hat. Kernidee ist dabei die Verstärkung der Wirkung öffentlicher Mittel, indem durch sie zusätzliche private Investitionen angezogen werden, z. B. mit hybriden Finanzierungsinstrumenten. Bisher wird der Wassersektor in vielen Ländern von privaten Investoren als wenig attraktiv bzw. Wasserunternehmen als wenig kreditwürdig wahrgenommen, u. a. aufgrund von technischen Ineffizienzen, Governancedefiziten sowie politischen, Markt- und Währungsrisiken (Alaerts, 2019; Money, 2022; Khemka et al., 2023). Als wesentliche Voraussetzung für ein stärkeres Engagement privater Investoren unterstützen daher u. a. die Weltbank (Khemka et al., 2023) und Deutschland mit der Urban Water Catalyst Initiative (UWCI, 2024) in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens den Aufbau von Fähigkeiten und Kapazitäten bei öffentlichen Unternehmen und Institutionen für effiziente Planung, Investitionsabwicklung und Betrieb, für Aufsicht, Regulierung und z. B. die Durchsetzung von Wasserpreisen.



Abbildung 8.3-1

Ausgewählte Handlungsfelder bei der Finanzierung wasserbezogener Investitionen. Der Fokus des Kapitels liegt auf den oberen drei Handlungsfeldern.
Quelle: WBGU

Diese Anstrengungen bleiben wichtig und bilden auch für Investitionen in klimaresilientes Wassermanagement die Basis (Abb. 8.3-1).

Allerdings kommen aufgrund der beschriebenen wasserbezogenen Verschärfungen und regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension (Kap. 3, 4) und daraus entstehendem Veränderungsbedarf (Kap. 6, 7) folgende Schwerpunkte hinzu, auf die dieses Kapitel fokussiert (Abb. 8.3-1): Erstens ist eine höhere Transparenz über wasserbezogene Risiken für Unternehmen (im Wassersektor und außerhalb), Kommunen und Volkswirtschaften nötig, um Investitionen zu mobilisieren und zu lenken (Kap. 8.3.1). Zweitens sollte mehr in lokal angepasste Projekte mit systemisch z. T. auch außerhalb des Wassersektors wirkenden, oft naturbasierten Ansätzen investiert werden. Das bedeutet kleinere Projekte – mit aus Sicht großer Investoren höheren Transaktionskosten – deren Erträge aufgrund schwerer „monetarisierbarer“ Mehrgewinne außerdem stärker von politischen Entscheidungen abhängig sind (z. B. öffentliche Vergütungen für die Erhaltung von Ökosystemleistungen). Einnahmequellen vor allem für nachhaltige wasserbezogene Projekte und Maßnahmen bzw. Geschäftsmodelle müssen daher insgesamt stabilisiert werden (Kap. 8.3.2). Zudem muss zwischen wasserbezogenen Investitionsprojekten einerseits und möglichen Investoren andererseits – von internationalen und öffentlichen Geldgebern über große Wasserverbraucher bis hin zum privaten Kapitalmarkt – besser vermittelt werden und Finanzierungsmodelle

müssen jeweils strukturiert werden (Kap. 8.3.3).

8.3.1
Wasserbezogene Risiken transparent machen, um Investitionen zu mobilisieren und zu lenken

Viele Unternehmen sind direkt als Wasserverbraucher oder durch wasserbezogene Extremereignisse, aber auch indirekt durch Lieferketten von wasserbezogenen Risiken betroffen, und beeinflussen umgekehrt selbst Wasserhaushalt und -qualität. Dies betrifft neben der Wasserwirtschaft und der Landwirtschaft (Kap. 6.3) auch die Stromerzeugung (Kasten 7.4-2) und die Industrie. Viele dieser Unternehmen (und ihre jeweiligen Geldgeber) haben Gründe, ihre Produktions-, Investitions- bzw. Finanzierungsentscheidungen anzupassen, und auch selbst in die Erhaltung und nachhaltige Nutzung von Wasserressourcennutzung und Katastrophenvorsorge zu investieren. Dies kann in Eigenregie erfolgen oder durch Beteiligung an gemeinschaftlichen Lösungen, z. B. im Rahmen von lokalen Wasserfonds bis hin zu internationalen Klimaanpassungsfonds (Kap. 8.1). Für eine ausreichende Mobilisierung und einen effizienten Einsatz dieses Kapitals müssen allerdings finanzielle Risiken, beispielsweise durch wasserbezogene Extreme, und Auswirkungen von Wirtschaftsaktivitäten auf den Wasserkreislauf ausreichend bekannt und transparent sein („doppelte Materialität“). Letztere verursachen Kosten

 Physische Risiken	Überflutungen, Dürren, abnehmenden Wasserqualität, Vulnerabilität von Ökosystemen, erhöhte Wasserknappheit oder Wasserstress, unangemessene Infrastruktur
 Regulatorische Risiken	Strengere Wasserentnahmerechte oder Einleitungsgenehmigungen, Vorgaben zu Wassereffizienz, Wiederverwendung, Erhaltung oder Prozessstandards, regulatorische Unsicherheit, höhere Wasserpreise
 Reputations- und Marktrisiken	Widerstand der lokalen Bevölkerung oder Kommunen, stärkere Bedenken oder negative Rückmeldungen von Stakeholdern, Rechtsstreitigkeiten, verändertes Verbraucherverhalten
 Technologische Risiken	Datenzugang oder -verfügbarkeit, Übergang zu wassereffizienten und wenig Wasser verbrauchenden Technologien und Produkten – bei denen Firmen technologisch den Anschluss verlieren könnten – und ausbleibender Erfolg bei Investitionen in neue Technologien

Tabelle 8.3-1
Wasserbezogene Risikofaktoren, die bei Unternehmenswerten zu Verlusten führen und sie zu Belastungen machen kann.
Quelle: CDP und Planet Tracker, 2022

für die Allgemeinheit, die wiederum z. B. zu öffentlichem Widerstand oder schärferer Regulierungen führen können, so dass ihre Berücksichtigung auch im Unternehmensinteresse ist (Tab. 8.3-1). In ähnlicher Weise muss auch die öffentliche Hand über Risiken informiert sein, z. B. bei Infrastrukturplanung und Vergabeprozessen oder großen aggregierten volkswirtschaftlichen Risiken.

Die potenziellen Schäden durch wasserbezogene Risiken haben eine signifikante Größenordnung: Auf Unternehmensebene gaben in einer Studie von CDP (ehemals Carbon Disclosure Project) und Planet Tracker 69 % der teilnehmenden börsennotierten Unternehmen an, von wasserbezogenen Risiken betroffen zu sein, mit wirtschaftlichen Schäden von bis zu 225 Mrd. US-\$ (CDP und Planet Tracker, 2022). Zusammen können wasserbezogene Auswirkungen des Klimawandels zu signifikanten Reduktionen der Wirtschaftsleistung führen, die in manchen Weltregionen über 10 % liegen können (Kap. 3; World Bank, 2016b). Daraus ergeben sich auch für Finanzinstitutionen Risiken, die 2021 aber nur von einem Drittel dieser Institutionen erfasst und bewertet wurden (CDP und Planet Tracker, 2022). Dabei schätzt z. B. die Europäische Zentralbank (EZB), dass EU-weit 10,6 % der Bankkredite an Nicht-Finanzunternehmen einem erhöhten Hochwasserrisiko und 11,2 % bzw. 12,2 % einem Risiko durch Hitze bzw. Wasserstress unterliegen, die zudem bei wenigen Banken konzentriert sein können (ECB, 2021). Seitdem ist ein Umdenken der Finanzinstitutionen in der EU zu erkennen, aber auch 2022 erfasste keine von ihnen ihre Klima- und Umwelt Risiken umfassend, und 55 % haben formulierte Ziele und Pläne nicht effektiv umgesetzt (ECB, 2022). Dabei gilt auch für Unternehmen, dass sich eine Risikoreduktion oft auch wirtschaftlich lohnt: Beispielsweise standen bei einer Erhebung von CDP (CDP, 2021) mit 357 Firmen Wasserrisiken von 300 Mrd. US-\$ Minderungs- oder Vermeidungskosten von 55 Mrd. US-\$ gegenüber.

Angesichts des hohen Investitionsbedarfs und des Interesses von Unternehmen, Investoren und Kommunen, Wasserrisiken zu minimieren und Gewässer zu erhalten, hat sich in den letzten Jahren weltweit ein neuer Markt für private Finanzierung wasserbezogener Wirtschaftsaktivitäten gebildet. Das Ausgabevolumen von „blauen“ Anleihen ist zuletzt auf 6 Mrd. US-\$ im Jahr 2023 stark gewachsen, auch durch Niedrigeinkommensländer wie Usbekistan, wo die Regierung im Jahr 2023 eine nachhaltigkeitsbezogene Anleihe in Höhe von 348 Mio. US-\$ zur Finanzierung von Sanitärversorgung sowie Erhaltung von Wasserressourcen und Wasserbewirtschaftung begab. Noch bilden „blaue“ Finanzierungsinstrumente trotz hoher Finanzierungsnachfrage jedoch einen Nischenmarkt (CBI, 2024; Morgan Stanley, 2023). Um privates Kapital noch besser zu mobilisieren, sind bessere Informationen zu wasserbezogenen Risiken und eine Stärkung der

Berichtspflichten für Unternehmen notwendig.

8.3.1.1

Informationsangebot zur Bewertung von Wasserrisiken verbessern

Damit private Akteure (etwa Unternehmen, Banken, institutionelle und andere Investoren, Wirtschaftsprüfer, Versicherungen) und öffentliche Akteure wasserbezogene Risiken richtig einschätzen können und als Reaktion ggf. auch vermehrt selbst im Wasserbereich aktiv werden und investieren, ist eine gute Informationsbasis entscheidend. Hier gibt es Verbesserungsbedarf: So ergab z. B. eine Analyse der Bankenaufsicht der EZB, dass weniger als 10 % der EU-Finanzinstitutionen ausreichend aufgelöste und vorausschauende Information zu Klima- und Umweltrisiken nutzen (ECB, 2022). Das liegt teilweise an mangelnden Anstrengungen. Allerdings ist fraglich, ob räumlich und zeitlich ausreichend aufgelöste Daten über Wasserdargebot, -entnahmen und -speicher auch flächendeckend verfügbar wären. Da Schwankungen des Wasserhaushalts aufgrund des Klimawandels häufiger und stärker werden, langjährig beobachtete Grenzen überschreiten und auch bei Mittelwerten lokal noch große Unsicherheiten bestehen (Caretta et al., 2022; Milly et al., 2008; Kap. 3) sind außerdem bessere und feiner aufgelöste Projektionen bzw. entsprechende Modellierungskapazitäten und Szenarien notwendig, die die wenigsten privaten und öffentlichen Akteure aufbauen können.

Die deutsche Bundesregierung sollte daher die Erhebung, Sammlung und den Zugang zu tagesaktuellen Daten und langfristigen Projektionen zum lokalen Wasseraufkommen und Wassernutzungen sowie das Wissen lokaler Akteure zu interregionalen oder intersektoralen Kopplungen verbessern und auch andere Länder hierbei unterstützen. Ebenso sollten lokale Voraussetzungen und der Bedarf betroffener und beteiligter Akteure berücksichtigt werden: Dazu zählen auch Standortdaten, Projektionen zu Wasserverbrauch und -verschmutzung in Lieferketten und Produktionsnetzwerken sowie ausreichende Kompetenzen zu deren Auswertung und Nutzung. Entsprechende klimatologische, meteorologische und hydrologische öffentliche Dienste und Forschungseinrichtungen müssen dafür gegebenenfalls gestärkt, vernetzt und ihr Angebot für lokale Akteure verbessert werden. Eine mögliche Plattform für solche Daten auf europäischer Ebene ist das zentrale europäische Zugangportal (ESAP; EU, 2023), das die EU ab 2027 einrichtet, damit Privatpersonen und mögliche Geldgeber künftig kostenfrei, zentral und maschinenlesbar offengelegte Nachhaltigkeitsinformationen von Firmen einsehen, mögliche Risiken von vulnerablen Wasserinfrastrukturen besser erkennen und Chancen von wassersparsamen Wirtschaftsaktivitäten wahrgenommen werden können. Auf nationaler Ebene sollten die verbesserten Informationen

zu wasserbezogenen Risiken und die Risikobewertungen durch Unternehmen (Kap. 8.3.1.2) und Kommunen genutzt werden, um systemische Risiken im Rahmen von Stresstests besser erkennen zu können.

8.3.1.2

Nachhaltigkeitsberichterstattung zu wasserbezogenen Auswirkungen, Risiken und Chancen stärken

Auf Basis bereits heute verfügbarer – und zukünftig verbesserter – Informationen können Unternehmen und Investoren wasserbezogene Risiken bewerten. Dies wird zunehmend auch eingefordert. Die EU unternimmt seit 2018 eine umfassende Transparenzinitiative, zu der im Rahmen des EU-Aktionsplans für nachhaltige Finanzierung (Europäische Kommission, 2018) u. a. die Taxonomie-Verordnung (Kasten 8.3-1), die Corporate Sustainable Reporting Directive (CSRD, Nachhaltigkeitsberichterstattung für Unternehmen) und die Sustainable Finance Disclosure Regulation (SFDR, Offenlegungsverordnung für Finanzsektor) gehören. Mit der CSRD soll die Informationsverfügbarkeit zur Nachhaltigkeit von Unternehmensaktivitäten umfassend gestärkt und

mit der SFDR die Informationsbereitstellung gegenüber Geldgebern erhöht werden. Die EU-Taxonomie soll die Schnittstelle zwischen Finanzmärkten und Realwirtschaft mit einem gemeinsamen Klassifikationssystem nachhaltiger „grüner“ Wirtschaftsaktivitäten besetzen und zugleich Ambiguitäten bei der Beurteilung nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten ausräumen. Übergreifend zielt die EU darauf ab, private Geldgeber stärker bei der Finanzierung nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten zu beteiligen, u. a. in Bezug auf Wasser- und Meeresressourcen (Europäische Kommission, 2021a).

Gleichzeitig besteht Verbesserungsbedarf: Erste Erfahrungen mit der Anwendung der neuen Berichtsstandards deuten auf praktische Implementierungshürden bei der Datenerhebung, Verifizierbarkeit, Abdeckung und internationalen Anschlussfähigkeit hin (Arnold et al., 2023; PSF, 2024; Lötters-Viehof et al., 2023). Durch die international lückenhafte und fragmentierte Landschaft von Berichtsstandards (Kasten 8.3-1) bzw. den Aufwand, mehrere Standards zu bedienen, sind Investitionsprojekte schwerer für internationale Investoren zugänglich und vernetzte Kapitalmärkte können nicht optimal genutzt werden. Bei Klimaschutzbezogenen Standards

Kasten 8.3-1

EU-Taxonomie für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten in Bezug auf Wasser- und Meeresressourcen

Die EU-Taxonomieverordnung (EU, 2020) ist ein Kernbaustein des EU-Aktionsplans für nachhaltige Finanzierung, der darauf abzielt, die Finanzmärkte stärker an der Finanzierung langfristiger Umwelt- und Wasserziele im Rahmen des EU Green Deals zu beteiligen (Europäische Kommission, 2021a). Die EU-Taxonomie ermöglicht Unternehmen, ihre Nachhaltigkeitsambitionen gegenüber externen Geldgebern besser zu kommunizieren und Finanzinstitutionen, die Nachhaltigkeit von Wirtschaftsaktivitäten und Projekten zu bewerten und geeignete Finanzierungsinstrumente aufzusetzen.

Die EU-Taxonomie folgt den Prinzipien der Einheitlichkeit, Transparenz und Verbindlichkeit. Damit eine Wirtschaftsaktivität als taxonomiekompatibel (bezüglich Wasser- und Meeresressourcen) gilt, muss diese (a) einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz von Wasser- und Meeresressourcen unter technischen Kriterien leisten, (b) kein anderes Umweltziel erheblich beeinträchtigen und (c) sozialen Mindeststandards entsprechen. Nach Inkrafttreten der EU-Taxonomie-Verordnung 2018 erließ die EU-Kommission einen delegierten Rechtsakt zu den taxonomiefähigen Wirtschaftsaktivitäten (Europäische Kommission, 2023b). Dazu zählen u. a. Aktivitäten der Herstellung und Montage von Technologien zur Leckagekontrolle in Wasserversorgungssystemen, Bau-, Erweiterung- oder Modernisierungsmaßnahmen der kommunalen Abwasserinfrastruktur wie Abwasserbehandlungsanlagen, Kanalisation oder Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

sowie Planungs-, Bau- oder Erweiterungsmaßnahmen zum naturbasierten Hochwasser- und Dürremanagement sowie zur Wiederherstellung von Küsten- oder Binnengewässerökosystemen (Europäische Kommission, 2023b).

Die EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung verpflichtet künftig bis zu 50.000 EU-Unternehmen, die Wesentlichkeit wasserbezogener Risiken für ihr Geschäftsmodell zu untersuchen und damit über ihre taxonomiefähigen und -kompatiblen Anteile ihres Umsatzes sowie ihrer Kapital- und Betriebsausgaben zu berichten. Hierzu zählen alle großen Kapitalgesellschaften bestimmter Branchen mit mehr als 250 Mitarbeitenden, mehr als 50 Mio. € Umsatz und einer Bilanzsumme von mehr als 25 Mio. €, wobei zwei der drei Kriterien erfüllt sein müssen. Zudem gilt die Regelung auch für Körperschaften des Öffentlichen Rechts, wenn diese nach den länderspezifischen Regelungen ebenfalls zur Berichterstattung großer Kapitalgesellschaften verpflichtet sind. Somit wird die Berichtspflicht ebenfalls für viele wasserwirtschaftliche Gesellschaften in Deutschland und Europa gelten.

Nachhaltigkeitstaxonomien wurden in den letzten Jahren von vielen Regierungen, darunter in China, Südafrika, Japan oder Kolumbien, aufgelegt, um neben verschiedenen freiwilligen Standards einheitliche gesetzliche Regime hinsichtlich der Auswirkungen von Wirtschaftsaktivitäten auf Wasserkreisläufe zu etablieren (IPSF, 2023). In einigen Fällen, etwa in Südafrika, diente die EU-Taxonomie als Vorlage (Lötters-Viehof et al., 2023). Während die EU-Taxonomie-Berichterstattung künftig auch nichteuropäische Unternehmen in bestimmten Fällen erfasst, fehlt derzeit eine Grundlage zur gegenseitigen Anerkennung zwischen verschiedenen gesetzlichen Klassifikationsregimen.

gibt es bereits Anstrengungen für eine internationale Harmonisierung, etwa durch Initiativen wie die International Platform on Sustainable Finance (IPSF) und das International Sustainability Standards Board (ISSB). Die 2017 von der Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) verabschiedeten Empfehlungen zur Klimaberichterstattung sind heute die Basis zahlreicher Klimaschutzbezogener Standards in Europa (im Rahmen des ESRS E1; EFRAG, 2022) und international (z. B. im Rahmen des IFRS S2; IFRS, 2023). In ähnlicher Weise sollten gesetzliche Nachhaltigkeitsstandards in Bezug auf Wasser international harmonisiert werden, hierfür sollten sich Deutschland und die EU engagieren.

Um die Einstiegshürden zur Fremdmittelfinanzierung insbesondere für Unternehmen zu senken und die Attraktivität naturbasierter Investitionen bei Mittelgebern zu erhöhen, könnten kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) bei der erstmaligen oder freiwilligen Berichterstattung entlastet werden. Beispielsweise kündigte die Regierung von Singapur 2024 Zuschüsse zur Kostendeckung der erstmaligen Nachhaltigkeitsberichterstattung im Einklang mit neuen verpflichtenden Standards an, für große Unternehmen bis zu 30 %, für KMU bis zu 70 % (Segal, 2024).

Deutschland kann zudem Erfahrung zu Unterstützungsangeboten und kapazitätsstärkenden Maßnahmen mit anderen EU-Ländern austauschen. Beispielsweise stellt Dänemark eine Open-Source-Software bereit, Tschechien macht Unterstützungsangebote und ernennt „Verwaltungsexperten“, in Polen gibt es Schulungs- und Informationsangebote (Europäische Kommission, 2024b).

8.3.2

Wassersektor attraktiver machen durch stabilere Einnahmequellen

Investitionen privater, kommerzieller Akteure in wasserbezogene Projekte erfordern verlässliche Einnahmeströme, mit denen Betriebs- und Instandhaltungskosten gedeckt werden können und Investoren eine Rendite gezahlt werden kann. Und auch für öffentliche Akteure sind angesichts knapper Haushaltsmittel stabile Einnahmequellen wichtig. Dies gilt auch – und ist oft besonders schwierig – für lokal angepasste und naturbasierte Lösungen, die die Multifunktionalität von Wasser und die Bedeutung grünen Wassers besonders berücksichtigen und ökologische, soziale sowie ökonomische Mehrgewinne bringen, die aber schwer zu erfassen sind. Die folgenden drei Hebel scheinen für die Stabilisierung der Einnahmeströme besonders vielversprechend. Die beiden ersten generieren insbesondere Einnahmen für die öffentliche Hand, welche in den Wassersektor, z. B. in naturbasierte Lösungen, investiert werden können. Der

dritte Hebel zielt auf die Entlohnung von Maßnahmen mit externalisierten Mehrgewinnen für private Akteure.

8.3.2.1

Verursacher und Nutzer stärker an Kosten beteiligen

Eine „stärkere Nutzer- und Verursachieranlastung“ von Kosten „kann zur finanziellen Entlastung und zur langfristigen Sicherstellung einer adäquaten Aufgabenwahrnehmung des Staates beitragen“ und Lenkungswirkung entfalten, so die Nationale Wasserstrategie der Bundesregierung (BMUV, 2023b: 62). Dem Verursacherprinzip sollte z. B. bei der Deckung der operativen Kosten für den Betrieb von Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur sowie bei der Gewässerreinigung stärker Rechnung getragen werden. Auch angesichts einer vielfach eingeschränkten Kreditwürdigkeit von Infrastrukturbetreibern (Khemka et al., 2023) scheint dies notwendig. Eine stärkere Nutzer- und Verursachieranlastung von Kosten kann unter anderem durch die folgenden Maßnahmen erreicht werden:

Differenzierte Tarifstrukturen für Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung: Nach Nutzungsmenge gestaffelte Wasser- und Abwassertarife mit höheren Preisen für Großverbraucher generieren Einnahmen und setzen Anreize, hohe Verbräuche zu senken. Konsumbasierte Subventionen können dabei sicherstellen, dass sich auch arme Haushalte Wasserver- und auch Abwasserentsorgung leisten können (z. B. bieten viele Wasserversorger in Kalifornien über Lifeline Rates niedrige Preise für Verbrauchsmengen entsprechend der Grundbedürfnisse). Allerdings zeigen Studien, dass solche Subventionen in vielen Ländern niedrigen und mittleren Einkommens arme Haushalte nicht gut erreichen. Ein Grund hierfür ist, dass arme Haushalte oft nicht an ein Wassernetz angeschlossen sind (Komives et al., 2005; Abramovsky et al., 2020). Alternativen, um auch Haushalte ohne Anschluss oder Wasserzähler zu erreichen, sind z. B. niedrige Grundgebühren für den Wasseranschluss oder konsumunabhängige Zuwendungen an Haushalte, um diese bei der Zahlung von Wasser- und Abwassergebühren zu unterstützen (Komives et al., 2005; Pierce et al., 2020), etwa mit Mitteln aus der Entwicklungszusammenarbeit.

Angemessene Entgelte für Wasserentnahmen auch für Großverbraucher: Auch über Wasserentnahmeentgelte können Großverbraucher systematisch an den Kosten für Maßnahmen etwa für den Gewässerschutz beteiligt werden, wenn Einnahmen entsprechend zweckgebunden werden. Voraussetzung ist allerdings, dass Ausnahmen für wasserintensive Wirtschaftszweige wie Bergbau und die Landwirtschaft abgebaut werden, wie sie in vielen deutschen Bundesländern und OECD-Ländern noch umfänglich existieren (Kap. 2.5.2). Die Bundesregierung sieht in ihrer Nationalen Wasserstrategie vor, eine

Harmonisierung der Entnahmeentgelte über die Länder und ggf. bundeseinheitliche Regelung zu prüfen (BMUV, 2023b). Unklar ist jedoch, inwieweit hierdurch auch Ausnahmen abgebaut werden. Ein Problem bei der Reform von Entnahmeentgelten ist die zum Teil mangelnde Erfassung von Wassernutzung, z. B. in der Landwirtschaft. Eine Reform muss daher mit einer verbesserten Erfassung von Entnahmen sowie Bedarfsmanagement einhergehen.

Abgaben auf wassergefährdende Produkte und Stoffe: Produzenten und Inverkehrbringer wassergefährdender Produkte und Stoffe sollten an mit diesen im Zusammenhang stehenden Kosten für deren Beseitigung und der Erhaltung von Gewässern stärker beteiligt werden. Ein wichtiges Beispiel sind Abgaben auf Pestizide in der industriellen Landwirtschaft. So erhebt u. a. Dänemark eine mengen- und risikobasierte Pestizidsteuer. Die rechtlichen Grundlagen für eine EU-weite Einführung einer Pestizidabgabe sind laut Möckel et al. (2021) gegeben. Gefährdungen für Wasser entstehen aber nicht nur durch Pestizide und Chemikalien, sondern auch durch den Klimawandel. Klimaschutzabgaben sollten in der Höhe so bemessen sein, dass sie wasserbezogene Schäden einbeziehen. Entsprechend könnten Einnahmen aus den Klimaschutzabgaben anteilig zur Finanzierung im Wassersektor herangezogen werden.

Steuereinnahmen aus Umweltsteuern (ohne Klimaschutzabgaben) hatten 2021 in der EU einen Anteil von 2,2 % des Bruttoinlandsproduktes und 5,5 % der gesamten staatlichen Einnahmen aus Steuern und Sozialbeiträgen; davon entfallen nur 3,6 % auf Steuern auf Verschmutzung und Ressourcen, unter welche auch die erwähnte dänische Pestizidsteuer fällt. Deutschland berichtete 2021 keine Steuern, die in letztere Kategorie fielen und wies EU-weit einen der niedrigsten Anteile von Einnahmen aus Umweltsteuern relativ zu den gesamten staatlichen Einnahmen auf (EuroStat, 2023).

Erweiterte Herstellerverantwortung: Eine Möglichkeit, die Verursacher von Gewässerverschmutzung an Reinigungskosten zu beteiligen, stellt eine erweiterte Herstellerverantwortung dar. Die Reform der EU-Kommunalabwasserrichtlinie sieht unter anderem eine erweiterte Herstellerverantwortung für Arzneimittel- und Kosmetikhersteller vor (Kap. 2.4.2.3, 7.1.2). Diese sollen in Abhängigkeit der Menge der von ihnen in den Umlauf gebrachten Stoffe und ihrer Toxizität an der Finanzierung einer vierten Reinigungsstufe und neuer Monitoringmaßnahmen beteiligt werden. Wie genau diese Beteiligung umgesetzt wird – ob durch Steuern, Beiträge oder Abgaben anderer Art – bleibt den Mitgliedsstaaten überlassen. Auch die deutsche Wasserstrategie (BMUV, 2023b) nennt eine erweiterte Herstellerverantwortung von Herstellern und Inverkehrbringern gewässerbelastender Stoffe und Produkte als Ziel, welches auf EU-Ebene angestrebt werden soll.

Nutzenabhängige Kostenbeteiligung bei der Finanzierung öffentlicher Güter: Viele Maßnahmen im Wassersektor haben den Charakter öffentlicher Güter. Dies bedeutet unter anderem, dass Nutzer die Vorteile aus diesen Gütern auch dann genießen können, wenn sie sich nicht an den Kosten beteiligen. Beispiele sind Maßnahmen im technischen Gewässer- oder Hochwasserschutz wie der Bau von Deichen und Dämmen, Rückhaltebecken oder Versickerungsanlagen oder auch naturbasierte Maßnahmen wie das Anlegen urbaner Grünflächen für den Rückhalt und die Verdunstung von Regenwasser. Unterschiedliche Akteure profitieren in verschiedenem Maße von solchen Maßnahmen und sollten gemäß den aus ihnen gezogenen Nutzen an deren Kosten beteiligt werden. Eine Möglichkeit hierfür bieten differenzierte Abgaben (Toxopeus und Polzin, 2021). Diese könnten z. B. zur Finanzierung von Flutvorsorgemaßnahmen wie der Instandhaltung und Stärkung von Deichen und Dämmen herangezogen werden und Grundstückseigentümer, die direkt von den Bauwerken profitieren, stärker belasten. So werden in Deutschland Sanierung und Bau von Deichen teilweise durch differenzierte Mitgliedsbeiträge zu Deichverbänden finanziert (z. B. §79 Landeswassergesetz Nordrhein-Westfalen).

Auch in Geld messbare positive Nebeneffekte der Bereitstellung öffentlicher Güter könnten über heterogene Abgaben (z. B. Grundsteuer, Erschließungsbeiträge) abgeschöpft und zur Finanzierung verwendet werden, etwa Steigerungen im Wert von Grundstücken und Immobilien in der Nähe neu angelegter Grünflächen (Toxopeus und Polzin, 2021). Grenzen setzen hier jedoch oft eingeschränkte Kompetenzen von Städten und Gemeinden zur Erhebung von Abgaben (Kap. 8.3.2.2).

8.3.2.2

Stärkung der Kompetenz zur Mittelherhebung- und Verwendung auf lokaler Ebene

Eine Barriere bei der Finanzierung wasserbezogener lokaler öffentlicher Güter sind die häufig eingeschränkten Kompetenzen lokaler Regierungs- und Verwaltungsebenen, eigene Einnahmen zu erheben und über deren Verwendung frei zu entscheiden. Damit sie zu klimaresilientem Wassermanagement beitragen können, scheint eine Stärkung ihrer Möglichkeiten in der Mittelherhebung und Entscheidungshoheit im Bereich der Mittelverwendung notwendig (Kap. 8.3.4).

Städte und Kommunen haben oft wenig Freiraum, eigene Steuern zu erheben, entweder weil Steuern grundsätzlich zentral erhoben werden oder weil, in föderalen Staaten wie Deutschland oder den USA, derselbe Tatbestand nur einmal besteuert werden darf und dies bereits durch höhere Ebenen geschieht oder auch weil Steuersätze nicht dezentral festgelegt werden dürfen, um Unterschiede zwischen Kommunen zu vermeiden (Droste

et al., 2017). In Deutschland beispielsweise genießen die Gemeinden zwar finanzielle Eigenverantwortung, Art. 28 Abs. 2 S. 3 GG. Jedoch gilt dies nur im Rahmen ihres Rechts auf kommunale Selbstverwaltung, muss also Angelegenheiten der örtlichen Gemeinschaft betreffen, und wird begrenzt durch Bundes- und Landesgesetze, etwa die Kommunalabgabengesetze der Länder (WD, 2022). Beispiel für eine solche Begrenzung ist in Deutschland die Grundsteuer. Bei ihrer Berechnung fließt die Lage von Grundstücken z. B. über Bodenrichtwerte zwar in die Berechnung der Grundsteuer ein, Kommunen können diese Werte jedoch nicht beeinflussen und sie somit nicht nutzen, um Kosten der Bereitstellung lokaler öffentlicher Güter gezielt umzulegen. Auch über die Hebesätze ist dies nicht möglich, da sie für innerhalb einer Kommune liegende Grundstücke und Betriebe der Land- und Forstwirtschaft jeweils einheitlich sein müssen (§ 25 Abs. 4 Grundsteuergesetz; Petersen, 2024).

Das Beispiel des Wolkenbruchplans in Kopenhagen (Kap. 6.4.1) zeigt, dass es notwendig sein kann, lokale oder nationale Verordnungen und Vorschriften anzupassen, um die Umlage von Kosten zu ermöglichen. So hat Dänemark mit einem Zusatz zum Wassersektorgesetz 2012 auf nationaler Ebene die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass Abwasserunternehmen, z. B. in Kopenhagen, in Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel investieren und die Kosten hierfür in den Abwassergebühren berücksichtigen können (The City of Copenhagen, 2012; TFCCA, 2012).

Generell ist die Einnahmenverwendung auf lokaler Ebene in vielen Ländern dadurch eingeschränkt, dass ein großer Teil der Einnahmen bereits durch eine Reihe verpflichtender öffentlicher Aufgaben gebunden ist. Lokalen Verwaltungen stehen dann nur begrenzte Mittel zur freien Verwendung zur Verfügung (Droste et al., 2017). Einnahmen z. B. aus Pestizidsteuern oder einer erweiterten Herstellerverantwortung können Entlastung schaffen, wenn sie zumindest anteilig Städten und Kommunen für die Umsetzung lokaler Maßnahmen zufließen (Kap. 8.3.2.1).

Niedrigeinkommensländer stehen oft vor besonderen Herausforderungen bei der Erhebung und effizienten Verwendung staatlicher Einnahmen, nicht nur auf lokaler Ebene. Dies zeigt z. B. eine Studie der Weltbank für 28 Länder mit den weltweit niedrigsten Einkommen (World Bank, 2023a): Zwischen 2011 und 2019 machten staatliche Einnahmen nur 18 % des Bruttoinlandsprodukts aus, verglichen mit 39 % in Hoheinkommensländern. Defizite zeigten sich vor allem bei Steuereinnahmen und hier insbesondere bei Steuern auf Güter und Dienstleistungen, aber auch Einkommens- und Unternehmenssteuern. Gründe hierfür sind laut der Weltbank u. a. die Größe des informellen Sektors und die damit verbundene eingeschränkte Steuerbasis sowie institutionelle und

strukturelle Schwächen, wie fehlenden Kapazitäten und Korruption, die das Eintreiben von Steuern erschweren. Auch die Erhebung von Abgaben, die an Landeigentum gekoppelt sind, ist in Niedrigeinkommensländern erschwert, da Landrechte häufig unklar oder unsicher sind. Dies beschränkt beispielsweise auch die Möglichkeiten, die Bereitstellung wasserbezogener Ökosystemleistungen finanziell zu unterstützen (WBGU, 2020). Gleichzeitig führen institutionelle und strukturelle Schwächen auch zu einer vergleichsweise ineffizienteren Verwendung von Steuereinnahmen (World Bank, 2023a).

8.3.2.3

Mehrgewinne nutzen und private Akteure besser entlohnen

Die Berücksichtigung von Mehrgewinnen, auch über den Wassersektor hinaus, kann für öffentliche und private Akteure zusätzliche Einnahmequellen eröffnen. Ein Problem bei der Umsetzung und Finanzierung wasserbezogener Maßnahmen mit Mehrgewinnen durch private Akteure ist jedoch, dass potenzielle Mehrgewinne häufig als soziale und ökologische aber auch indirekte ökonomische Vorteile auftreten, die von privaten Akteuren nicht oder nicht umfassend in ihren Kosten-Nutzen-Abschätzungen berücksichtigt werden. Projekte wie naturbasierte Lösungen sind dann für private Akteure weniger attraktiv. So machen private Investitionen bisher nur einen kleinen Teil der Finanzierung naturbasierter Lösungen aus. Schätzungen von UNEP zufolge werden global gesehen etwa 86 % der naturbasierten Lösungen öffentlich finanziert (UNEP, 2021). Europaweit berichten von 1.364 erfassten Projekten einer Studie der EIB zufolge nur 3 % private Beteiligung, welche mehr als 50 % der Kosten deckt (EIB, 2023a).

Die Integration von Mehrgewinnen in privatwirtschaftliche Entscheidungen kann die Investitionsbereitschaft erhöhen. Ziel ist dabei nicht die Verdrängung staatlichen Engagements im Bereich der Daseinsvorsorge, sondern die Eröffnung neuer Finanzierungsquellen für ergänzende Finanzierung unter klaren politischen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen und die Unterstützung und Lenkung privatwirtschaftlicher Investitionen in Maßnahmen mit Mehrgewinnen.

Nutzung monetarisierbarer Mehrgewinne: Potenziale für Mehrgewinne, die zur Erzielung von Einnahmen genutzt werden können, entstehen im Wassersektor, aber auch in anderen Sektoren, z. B. in den Bereichen Energie oder Ernährung. Die Berücksichtigung des „Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus“ kann helfen, diese zu identifizieren und zu nutzen: So könnten Kläranlagen Abwasser und Faulgas als erneuerbare Energieträger für die Erzeugung von Wärme nutzen und diese ins Netz einspeisen. Anlagen, die mit Wärme aus Abwasser bereits auf diese Weise verfahren, gibt es in der Schweiz, z. B.

in Zürich, in Deutschland bisher nur vereinzelt, z. B. in Lemgo. Eine Studie des Potenzials in Baden-Württemberg zeigt, dass die Nutzung wirtschaftlich interessant ist, jedoch einen Ausbau der Nah- und Fernwärmenetze erforderlich macht (Blömer et al., 2023). Generell ist das Wissen über die Möglichkeiten und Potenziale in Deutschland noch gering. Auch sind rechtliche Fragen zu klären, z. B. zur Erhebung von Entgelten für die Abwassernutzung (UBA, 2023c). Bezüglich Klärgas verweist das UBA (UBA, 2018a) auf die Möglichkeiten, das Gas auch über die Eigenstromproduktion von Kläranlagen hinaus im Energiesektor, im Verkehr oder zur Wärme- und Kälteversorgung zu nutzen. Die Politik müsse die technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so weiterentwickeln, dass Kommunen diese nutzen können.

Entlohnung von Maßnahmen mit schwer monetarisierbaren Mehrgewinnen für private Akteure: Viele Maßnahmen, welche die Klimaresilienz steigern können, wie z. B. naturbasierte Lösungen, haben keine leicht monetarisierbaren Nutzen in Form von Erträgen oder vermiedenen Kosten. Bei anderen reichen die monetarisierbaren Nutzen nicht aus, um Investitionskosten zu decken und sie für private Akteure attraktiv zu machen. In diesem Fall kann die öffentliche Hand einspringen und Projekte z. B. durch Kofinanzierung von Projekten oder Public-Private-Partnerships mit Blended Finance unterstützen (Calliari et al., 2022; Kap. 8.3.3).

Eine Alternative, um Maßnahmen mit Mehrgewinnen wie naturbasierte Lösungen zu finanzieren, sind Entlohnungen für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (EIB, 2023a). Diese können u. a. durch gezielte Zahlungen der öffentlichen Hand erfolgen, welche durch eine Subventionsreform oder die in Kap. 8.3.2.1 angesprochenen Einnahmequellen finanziert werden könnten. So empfiehlt die EIB zum Beispiel die GAP in der EU ab 2028 dahingehend zu reformieren, dass sie naturbasierte Maßnahmen in der Landwirtschaft stärker fördert und keine Fehlanreize für die Ausdehnung landwirtschaftlicher Aktivitäten in Randgebiete setzt (EIB, 2023a). Hierbei sollte ein besonderes Augenmerk auf solche Maßnahmen gelegt werden, die der Erhaltung der Wasserressourcen zugutekommen. Die EIB sieht die Finanzmittel der GAP insgesamt als ausreichend zur Finanzierung einer signifikanten Ausweitung naturbasierter Lösungen in der EU (EIB, 2023a).

Neben Zahlungen der öffentlichen Hand können Steuererleichterungen und Senkungen von Abgaben Maßnahmen mit gesellschaftlichen und ökologischen Mehrgewinnen relativ zu anderen Ansätzen attraktiv machen (Toxopeus und Polzin, 2021; EIB, 2023a). So fördert die Stadt Hamburg die Installation grüner Dächer durch öffentliche Zuschüsse und eine Senkung der Niederschlagswassergebühr (BUKEA, 2024).

Eine Möglichkeit, auch in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen Mittel für die Förderung von Maßnahmen mit Mehrgewinnen bereitzustellen, könnten Debt Swaps darstellen (Schuldenumwandlungen; WBGU, 2023, 2024), welche konkret an wasserbezogene Maßnahmen gekoppelt werden könnten. Dabei verzichtet der Kreditgeber – häufig, aber nicht immer ein Staat – auf die Rückzahlung eines gewährten Kredits. Im Gegenzug erklärt sich der kreditnehmende Staat bereit, einen vorher festgelegten Betrag zur Finanzierung eines inländischen Projekts zum Schutz von Wasserressourcen oder der Umsetzung eines klimaresilienten Wassermanagements zu verwenden. Wasserbezogene Debt Swaps könnten sich in der Zusammenarbeit mit Ländern anbieten, deren Governancesysteme bezüglich Rechenschaftspflicht, Transparenz und sachorientierter Bewirtschaftung die notwendigen Voraussetzungen mitbringen (WBGU, 2024).

Kompensationen für schwer monetarisierbare Mehrgewinne sind aber nicht notwendigerweise an Zahlungen der öffentlichen Hand gebunden, wenngleich sie häufig aus staatlicher Regulierung resultieren:

Naturbasierte Lösungen bzw. Ökosystemleistungen könnten beispielsweise über Wasserfonds finanziert werden, in die private Akteure einzahlen. Dies kann auf freiwilliger Basis geschehen, wenn entsprechende Anreize existieren, weil etwa Wasserversorger davon profitieren, wenn Landbesitzer Maßnahmen ergreifen, die zum Schutz von Wasserressourcen beitragen (Kap. 8.3.3), oder auch mithilfe von Regulierung durchgesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit, Zahlungen für wasserbezogene Ökosystemleistungen zu etablieren sind Gutschriften, etwa für CO₂-Kompensation, Biodiversität, Feuchtgebiete oder auch, speziell im Kontext Wasser, themenbezogene Zertifikate etwa für die Erhaltung von Meeres- und Küstenökosystemen oder den Ausgleich von Wasserverschmutzung. Der Verkauf von Gutschriften, ggf. in Verbindung mit Cap-and-Trade-Systemen, kann signifikante Erträge für naturbasierte Lösungen erwirtschaften und so die Skalierung der Maßnahmen ermöglichen (EIB, 2023a), birgt jedoch auch Herausforderungen und Risiken (Kasten 8.3-2).

8.3.3

Finanzierungen vermitteln: Intermediäre Institutionen strategisch stärken

Neben mangelndem Bewusstsein für wasserbezogene Risiken (Kap. 8.3.1) und Unsicherheit der Einnahmequellen sowie des politischen und des wirtschaftlichen Umfelds in vielen Ländern, in denen hoher Investitionsbedarf besteht, und damit der Rückzahlungsmöglichkeiten von Investitionen (Kap. 8.3.2) gibt es weitere Gründe, warum wasserbezogene Projekte oft keine Finanzierung

Kasten 8.3-2**Handelssysteme zur Reduktion von Nährstoffeinträgen in Gewässer und Finanzierung naturbasierter Lösungen**

Am Beispiel der Reduktion von Nährstoffeinträgen in Gewässer lassen sich Potenziale, Herausforderungen und Risiken eines Handels mit Verschmutzungsrechten und einer darauf basierenden Finanzierung naturbasierter Lösungen verdeutlichen. Grundsätzlich kann der Handel mit Verschmutzungsrechten dabei entweder (1) im Rahmen verpflichtender Verschmutzungsreduktionen erfolgen oder (2) Beiträge zur Erreichung freiwillig gesteckter Ziele ermöglichen.

Grundgedanke eines Handelssystems bei verpflichtender Verschmutzungsreduktion ist, wie beim Europäischen Emissionshandel für Treibhausgasemissionen, eine vorgegebene Minderung der Verschmutzung möglichst kosteneffizient zu erreichen (EPA, 2024). Typischerweise werden dabei Unternehmen gesetzlichen Auflagen zur Begrenzung von Verschmutzung (z. B. Nährstoffeinträge in Gewässer) unterworfen. Gelingt es ihnen, ihre Verschmutzung weiter zu reduzieren, können sie nicht benötigte Verschmutzungsberechtigungen an andere Unternehmen, die ihre Ziele nicht erreichen, verkaufen. So wird ein gegebenes Reduktionsziel für die Gesamtverschmutzung durch diejenigen Unternehmen umgesetzt, denen dies am günstigsten möglich ist.

Insbesondere in den USA ist der Handel mit solchen Verschmutzungsrechten bei Wasserverschmutzung verbreitet (EPA, 2024). Gehandelt werden vor allem Berechtigungen für Stickstoff und Phosphor. Unternehmen wie Anlagen zur industriellen oder kommunalen Abwasserbehandlung (sogenannte Punktquellen) müssen ihre Nährstoffeinträge in Gewässer begrenzen und können bei zusätzlicher Reduktion der Verschmutzung ihre Berechtigungen verkaufen. Zum Teil können sich auch diffuse Verschmutzungsquellen, z. B. in der Landwirtschaft, die häufig nicht zur Verschmutzungsreduktion verpflichtet sind, Minderungen ihrer Nährstoffeinträge in Form von Gutschriften verbrieften lassen und diese Gutschriften an regulierte Unternehmen zur Erfüllung ihrer Verpflichtungen verkaufen. Solche Gutschriften können z. B. durch regulierte Unternehmen oder Kommunen in Virginia und Pennsylvania im Flusseinzugsgebiet Chesapeake Bay unter Auflagen genutzt werden (Stephenson und Shabman, 2017).

Auf diese Weise kommt es zu einer Finanzierung von Maßnahmen im unregulierten Sektor Landwirtschaft durch die regulierten Unternehmen. Landwirt:innen und sonstige Landbesitzer:innen können sich durch Teilnahme am Handel zum Beispiel für die Schaffung oder Erhaltung von Feuchtgebieten, Wiederaufforstung oder die Umwandlung von Ackerland in Grünland entschädigen lassen. Je strenger die gesetzlichen Auflagen für Punktquellen gemessen an den technologischen Möglichkeiten, desto höher sind ihre Anreize, dort Reduktionspotenziale zu nutzen, wo diese günstig sind, wie beispielsweise in der Landwirtschaft (Stephenson und Shabman, 2017).

Über die Erreichung gesetzlich vorgegebener Ziele hinaus ist auch ein Handel mit Gutschriften zur Erreichung freiwilliger

Ziele möglich. Unternehmen, Organisationen oder Kommunen, die keiner Regulierung unterliegen, können Gutschriften z. B. für Verschmutzungsreduktionen aus der Landwirtschaft verwenden, um Nährstoffeinträge in Gewässer zu kompensieren und so freiwillige Verpflichtungen zur Begrenzung der Nährstoffeinträge einzuhalten. Auch hier finanzieren Zahlungen für die Gutschriften die Maßnahmen zur Begrenzung von Nährstoffeinträgen.

Der Handel mit Gutschriften für Best-Practice-Methoden in der Landwirtschaft, zur Renaturierung oder Flächenumwandlung ist auch zur Entlohnung von Maßnahmen mit Mehrgewinnen interessant, etwa naturbasierten Lösungen. Insgesamt hat die Einbeziehung der Landwirtschaft in den Handel mit Gutschriften Potenzial, Beiträge zur Finanzierung naturbasierter Lösungen zu generieren, allerdings sind damit auch Risiken und Herausforderungen verbunden:

- Grundsätzliche Risiken entstehen aus Unsicherheiten in der Ermittlung und dem zuverlässigen Monitoring der Reduktion von Nährstoffeinträgen durch die Landwirtschaft. Auch die fehlende Zusätzlichkeit, d. h. die Gefahr einer Entlohnung von Maßnahmen, die auch ohne diese Entlohnung umgesetzt würden (Stephenson und Shabman, 2017), ist eine Herausforderung. Diese Herausforderungen sind von anderen Systemen handelbarer Gutschriften, z. B. CO₂-Zertifikaten, bekannt.
- Erfahrungen mit bestehenden Märkten zeigen zudem, dass die Handelsvolumina für Gutschriften, die Landwirt:innen und Landbesitzer:innen für naturbasierte Maßnahmen entlohnen, gering sind (Stephenson und Shabman, 2017). Dies kann auf Barrieren für die Teilnahme von Landwirt:innen und Landbesitzer:innen am Handel oder auch fehlende Nachfrage nach Gutschriften aus der Landwirtschaft seitens Unternehmen und Kommunen zurückzuführen sein (Stephenson und Shabman, 2017). In den von Stephenson und Shabman (2017) betrachteten Märkten in den USA beschränkt sich der Handel mit Landwirten im Wesentlichen auf Fälle, in denen Bauträger in Städten Gutschriften nutzen, um Phosphor- oder Nitratreinträge in Gewässer durch ablaufendes Regenwasser bei Neubauprojekten zu kompensieren. In Großbritannien entstehen seit 2022 Märkte mit Fokus auf den Handel zwischen Bauträgern und Landwirt:innen bzw. Landbesitzer:innen. Zwei Beispiele, die explizit auf eine schnellere Umsetzung naturbasierter Maßnahmen zielen, sind der Somerset Catchment Market (SCM, 2024) im Südwesten und der Solent Catchment Market im Süden Englands (Solent Catchment Market, 2024), der gerade seine Pilotphase abgeschlossen hat.

Die vorgestellten Ansätze des Handels mit Gutschriften lassen Verschmutzung in der Landwirtschaft meist unreguliert und setzen auf freiwillige, finanziell angereizte Reduktionen. Es ist allerdings fraglich, ob ambitionierte Ziele für die Minderung von Nährstoffeinträgen in Gewässer oder Einzugsgebiete allein durch diese Anreize erreichbar sind, wenn die Landwirtschaft der mit Abstand größte Verursacher von Nährstoffeinträgen ist (Stephenson und Shabman, 2017). Insofern sollten Optionen für die Einbeziehung diffuser Quellen in ein solches Handelssystem geprüft werden.

Tabelle 8.3-2

Potenzielle Barrieren für die Umsetzung naturbasierter Lösungen für verbesserte Wassersicherheit, nach Akteuren des Wassersektors und Möglichkeiten diese Barrieren zu beseitigen.

Quelle: nach Trémolet et al., 2019

Wasserakteure	Potenzielle Barrieren für die Umsetzung naturbasierter Lösungen	Möglichkeiten, die Barrieren zu adressieren
Nationale Regierungen bzw. politische Entscheidungsträger	› Begrenztes Bewusstsein, was damit erreicht werden kann (bei allen aufgeführten Stakeholdern zu beobachten, z. T. aufgrund mangelnder Beratung) › Wahrnehmung, dass naturbasierte Lösungen für verbesserte Wassersicherheit riskanter als konventionelle „graue“ Lösungen seien und Bedenken zur Compliance › Unsicherheit über Effektivität und Kosteneffektivität	› Globale, regionale oder nationale Unterstützungsstrukturen etablieren, die spezifische Informationen bereitstellen › Gemeinsamen Rahmen zur Evaluierung der Effektivität und Kosten-Effektivität definieren und anwenden › Wissen über technische Lösungen und Hebel für die Umsetzung (Politikinstrumente, Governance, Finanzierung) sektorübergreifend verbreiten
Lokale Regierungen	› Bestehende Beschaffungsregeln für Wasserversorgungsdienstleistungen fokussieren übermäßig auf graue Infrastruktur › Evaluierungsregeln in Beschaffungsprozessen enthalten keine Optionen zur Bewertung › Begrenztes Wissen zu Planung, Umsetzung und Monitoring › Lokale Politikdokumente zu mehreren Bereichen, die naturbasierte Lösungen für verbesserte Wassersicherheit beeinflussen können, sind nicht gut koordiniert (z. B. zu Stadtplanung, Biodiversität, Wasser)	› Verträge basierend auf Ergebnissen statt auf technischen Spezifikationen oder spezifischen Leistungen definieren › Auditierungskriterien ergänzen, um naturbasierte Lösungen für verbesserte Wassersicherheit zuzulassen › Planungskapazität städtischer Entscheidungsträger verbessern, um naturbasierte Lösungen in systemische Ansätze für urbane Resilienz integrieren zu können › An städtischen Netzwerken und Allianzen beteiligen, die zur Verbreitung bewährter Praktiken beitragen können › Richtlinien zur Maximierung von Zusatznutzen entwickeln
Wasserversorger	› Betriebsmodell fokussiert auf Bau grauer Infrastruktur › Fokus auf Erfüllung regulatorischer Vorgaben, limitiertes Potenzial für Experimente und Risiken	› Kombinationen grüner und grauer Infrastruktur in optimierten Investitionsplänen systematisch einbeziehen › Mit anderen Akteuren (lokale Regierungen, Wassernutzer) zusammenarbeiten, um flussaufwärts bzw. in Wassereinzugsgebieten in naturbasierte Lösungen zu investieren
Landwirt:innen	› Land oder Wasserentnahmerechte werden nur zögerlich für Naturschutzzwecke verkauft › Anbaupraktiken werden aus Angst vor Ertrags- und Einkommenseinbußen nur zögerlich geändert › Mangel an Land, das zur Erhaltung der Natur bereitgehalten werden könnte	› Anreizzahlungen oder einfacheren Zugang zu Krediten bereitstellen › Informationen über verbesserte landwirtschaftliche Praktiken und Auswirkungen auf Erträge verbreiten › Ressourcen für Kauf und Umwandlung von Land zur Erhaltung der Natur bereitstellen

Kasten 8.3-3**Blended Finance: Definition, typische Strukturen und Herausforderungen**

Blended Finance wird allgemein definiert als „der Einsatz von katalytischem Kapital aus öffentlichen oder philanthropischen Quellen, um die Investitionen des privaten Sektors in nachhaltige Entwicklung zu steigern (...), ein Strukturierungsansatz, der es Organisationen mit unterschiedlichen Zielen ermöglicht, nebeneinander zu investieren und dabei jeweils ihre eigenen Ziele zu erreichen (sei es finanzieller Ertrag, soziale Wirkung oder eine Mischung aus beidem)“ (Convergence, 2024). Im Entwicklungskontext wird es bezeichnet als „strategischer Einsatz von Mitteln der Entwicklungsfinanzierung und philanthropischen Mitteln zur Mobilisierung privater Kapitalströme in Schwellen- und Grenzmärkten, mit positiven Ergebnissen sowohl für Investoren als auch für Gemeinden“ (OECD und WEF, 2015).

Zu den typischen Strukturen gehören (Convergence, 2024):

1. direkte Finanzierungen, bei denen private Mittel zu marktüblichen Konditionen und öffentliche oder philanthropische Mittel zu vergünstigten („konzessionellen“) Konditionen bereitgestellt werden, um die Finanzierungskosten zu senken;

2. Garantien oder Versicherungen gegen Kreditausfälle, die die kommerziellen Geldgeber zu vergünstigten Konditionen erhalten (credit enhancements);

3. technische Unterstützung des Projekts auf Basis rückzahlungsfreier Zuwendungen, um Risiken zu senken oder Erträge zu erhöhen;

4. rückzahlungsfreie Finanzhilfen für Design oder Strukturierung des Projekts.

Zu den Herausforderungen gehört, dass Effizienzanreize auch bei höheren Anteilen vergünstigter Kredite aufrecht erhalten und die Vergünstigungen wenn möglich sukzessive reduziert werden sollten, um die Reichweite bzw. Effektivität begrenzter öffentlicher Mittel zu erhöhen (siehe dazu auch die Prinzipien zu „Blended Concessional Finance“; DFI BCF, 2023). Idealerweise sollten außerdem lokale Investoren einbezogen werden, um Wechselkursrisiken zu reduzieren und Finanzmärkte zu entwickeln.

und Investoren keine geeigneten Projekte finden (Alaerts, 2019; Money, 2018, 2022; Laubenstein et al., 2023): Akteure des Wassersektors kennen die Anforderungen verschiedener Investorentypen zu wenig und haben Schwierigkeiten, passende Projekte vorzubereiten; im Finanzsektor mangelt es an Wissen über den Wassersektor, vor allem zur Bewertung von Projekten und deren Risiken, die durch hohe Anfangsinvestitionen und lange Rückzahlungszeiträume gekennzeichnet sind; der Wassersektor ist stark fragmentiert und Projekte sind oft kontextspezifisch und klein, was im Verhältnis hohe Transaktionskosten für Investoren bedeutet. Speziell bei „neuen“ Ansätzen, etwa non-sewered sanitation (nicht ans Abwassernetz angeschlossene Sanitäranlagen) oder naturbasierten Lösungen (NbS) zur Regulierung des Wasserhaushalts und der Wasserqualität, spielen mangelnde Erfahrung des formalen Wassersektors bis hin zu Lock-Ins (bei Planung, Technik, wirtschaftlichen Netzwerken, Regulierung, Praktiken, ...) eine wichtige Rolle; bei NbS fehlen z. T. auch Mechanismen oder Institutionen, über die etwa Wasserakteure in andere Landnutzungen investieren oder dafür Zahlungen an Landwirt:innen leisten könnten (Kap. 6.3.3; Tab. 8.3-2).

Daher ist die Vermittlung und ein besserer Austausch zwischen Akteuren und eine Bündelung von Aktivitäten zentral – zur Bereitstellung geeigneter Finanzierung, aber auch insgesamt für eine langfristige strategische Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Wasserakteuren und Geldgebern bzw. Investoren sowie für eine Bündelung kleinerer Projekte und Skalierung erfolgreicher Ansätze. Dabei können entsprechende Kooperationsplattformen eine wichtige Rolle spielen, die z. B. Wasserversorger,

Wassernutzer in Landwirtschaft, Energie, Industrie und Gewerbe, Landnutzer wie Land- und Forstwirtschaft, Siedlungen und Verkehr, Umwelt- und andere NGOs sowie die jeweiligen Regulierer und Akteure zusammenbringen mit Geldgebern der öffentlichen Hand, ODA, Stiftungen sowie privaten Investoren (für eine Typologie von Investoren siehe Money, 2018). Über diese Plattformen können eine gemeinsame Wissensbasis und Transparenz hergestellt, vorhandene Kompetenzen zusammengebracht, Strategien abgestimmt, Maßnahmen geplant und umgesetzt bzw. beauftragt, überwacht und evaluiert werden – und jeweils auch Geschäfts- und Finanzierungsmodelle vereinbart werden (Trémolet et al., 2019). Für solche Plattformen gibt es bereits viele Beispiele, z. B. Wasserfonds Quito, Nairobi, San Antonio in Texas und vielen anderen Städten mit ihren Einzugsgebieten (TNC, 2018; Vogl et al., 2017). Auch in einigen europäischen Ländern existieren Wassergenossenschaften (Kap. 8.2.3).

Im Rahmen solcher Plattformen können verschiedene Finanzierungsmodelle ausgehandelt bzw. für Investoren vorbereitet werden. Zum einen können Vergütungsverträge geschlossen werden zwischen Akteuren der Plattform, die direkten Wasserbezug haben, z. B. Wasserversorgern und Unternehmen, die auf sauberes Wasser angewiesen sind, und Landwirt:innen, die für den Verzicht auf bestimmte Pestizide oder starke Düngung von den Wasserversorgern und Unternehmen entlohnt werden. Beispiele hierfür sind Green Water Credit-Systeme, die in Kenia, Marokko und Algerien entwickelt wurden (ISRIC, 2024; Kap. 6.3) oder Kooperationen von Wasserversorgern mit Landwirt:innen in Bayern (LfU Bayern, 2024), etwa das „Augsburger Modell“, in dem

Landwirt:innen sich zu einem eingeschränkten Dünger- und Pestizideinsatz bereit erklären und dafür prämiert werden (swa, 2021).

Zum anderen können öffentliche Geldgeber, Stiftungen oder Banken in die Finanzierung von großen oder mehreren gebündelten Projekten einbezogen werden. Wenn eine Finanzierung zu Marktkonditionen nicht erreicht werden kann, weil die Einnahme- bzw. Refinanzierungsquellen zu gering oder risikobehaftet sind, können im Rahmen von „blended finance“ (Kasten 8.3-3) öffentliche oder philanthropische Geber einen Teil der Finanzierungskosten oder Risiken für nachhaltigkeitsorientierte Wasserprojekte übernehmen und so trotzdem private Geldquellen mobilisiert werden. Insbesondere für die Finanzierung naturbasierter Lösungen oder anderer Vorhaben, in denen nicht kommerzielle Ziele bzw. ökologische und soziale Mehrgewinne eine starke Rolle spielen, können blended-finance-Ansätze interessant sein, die ergebnisbasiert sind. Ein Beispiel sind „environmental impact bonds“, bei denen die öffentliche Hand Umweltziele für ein Projekt festlegt, private Geldgeber das Projekt zunächst finanzieren und für ihren Aufwand plus Zinsen z. B. mit öffentlichen Mitteln entlohnt werden, wenn die Ziele erreicht werden. In den USA wurden mit solchen Modellen grüne urbane Infrastruktur als Schutz vor Überflutungen, Maßnahmen gegen Waldbrände und naturbasierte Lösungen zur Verbesserung der Wasserqualität finanziert (Trémolet et al., 2019). Gegenüber Finanzierungsmodellen, die an die Verwendung einer vorab festgelegten Technik gebunden sind, erlauben ergebnisfokussierte Modelle ein Nachsteuern, erhöhen Wirksamkeit und Effizienz, und verbessern durch den Fokus auf Messbarkeit und Transparenz die Datengrundlage für weitere Projekte.

Ein drittes, noch wenig verbreitetes Modell ist die Bündelung vieler kleiner Investoren, etwa über spezielle Crowd Funding-Ansätze zur Finanzierung öffentlich-privater Partnerschaften. Werden auf diese Weise vor allem lokal Betroffene bzw. Nutzer des jeweiligen wasserbezogenen Projekts beteiligt und Transparenz geschaffen, kann dies ggf. die Akzeptanz vor Ort erhöhen (Ross, 2017).

Komplementär zu lokalen Kooperationsplattformen wirken übergreifende Finanzierungsmechanismen und -institutionen auf nationaler oder regionaler Ebene, auf die einzelne Projekte oder lokale Plattformen zurückgreifen können. Beispiele sind spezialisierte Banken oder revolvingierende Fonds, die verschiedene Finanzierungsquellen zusammenfassen, an Wasserprojekte vermitteln (in der Regel als blended finance) und die Rückzahlungen jeweils wieder für neue Finanzierungen im Wasserbereich nutzen (revolvieren). Diese spezialisierten Finanzierungsinstitutionen und andere, zwischen Nachfragern und Anbietern von Finanzierung im Wassersektor vermittelnde Institutionen, wie Beratungsfirmen, NGOs, Universitäten

oder Forschungseinrichtungen (Lardoux de Pazzis und Muret, 2021), spielen oft auch eine Schlüsselrolle bei der Einrichtung lokaler Plattformen (Lardoux de Pazzis und Muret, 2021; Laubenstein et al., 2023; Alaerts, 2019). Solche Institutionen sind in Hoheinkommensländern z. T. seit Jahrzehnten etabliert, etwa die im öffentlichen Besitz befindliche Nederlandse Waterschaps Bank (NWB Bank, 2024), Aquafin in Belgien oder Agences de l'eau entlang Flusseinzugsgebieten in Frankreich. Ein Beispiel für eine international als Intermediär aktive NGO ist The Nature Conservancy, die die Einrichtung von Wasserfonds unterstützt (TNC, 2018). In Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen gibt es erste Beispiele, wie den Philippine Water Revolving Fund (World Bank, 2016c) und den Kenya Pooled Water Fund (van Oppenraaij et al., 2022), die u. a. von internationalen Gebern unterstützt werden. Der Fokus liegt in diesen Ländern allerdings häufig auf sicherer Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Naturbasierte Ansätze zur Nutzung und Erhaltung wasserbezogener Ökosystemleistungen werden noch zu wenig berücksichtigt. Solche Strukturen sollten gezielt weiter ausgebaut (Lardoux de Pazzis und Muret, 2021) und als öffentliche Institutionen strategisch für das nötige Umsteuern im Wassersektor eingesetzt werden – für die Erreichung SDG 6, aber auch von Umwelt-, Klimaschutz- und Klimaanpassungszielen. Dies kann auch die neue Ausrichtung der Weltbank im Wassersektor unterstützen.

8.4 Wissenschaft und Bildung

Dem Wissenschafts- und Bildungssystem kommen beim Umgang mit den im Gutachten beschriebenen Herausforderungen und Verschärfungen eine zentrale Rolle zu.

8.4.1 Wissenschaft

Der WBGU definiert Wissenschaft umfassend und in Anlehnung an das Humboldtsche Ideal der Untrennbarkeit von Forschung und Lehre als Forschung, Bildung und Lehre sowie Politikberatung und grenzüberschreitende Wissenschaftskooperation.

8.4.1.1 Wissenschaft im Lichte der Verschärfungen

Der WBGU betont die Bedeutung inter- und transdisziplinäre Formen der Forschung, die multiperspektivische Wissensproduktion möglich macht. Dies umfasst die Disziplinen der Naturwissenschaften sowie der Sozial- und Kulturwissenschaften sowie auch Medizin, Informatik und Ingenieurwissenschaften. Wissenschaft

Kasten 8.4-1**Demokratienschutz und -förderung durch internationale Wissenschaftskooperationen zu Wasser**

Im Umgang mit gesellschaftlichen und politischen Verschärfungen spielt die wasserbezogene Wissenschaft eine wichtige Rolle. Einst ein technisch und infrastrukturell-fokussierter Bereich dominiert seit geraumer Zeit das Verständnis, dass systemische und gesellschaftlich eingebettete Ansätze notwendig sind, um das Wassermanagement in seiner langfristigen praktischen Ausgestaltung nachhaltig aufzustellen. Kernprinzipien gesellschaftlicher Einbindung, Teilhabe, Transparenz, Rechenschaftspflicht sowie Geschlechter- und Altersgerechtigkeit sind in der Weiterentwicklung und sicheren Umsetzung bestehender Wassermanagementsysteme von zentraler Bedeutung. Gerade in wasserbezogenen Wissenschaftskooperationen bietet es sich somit an, demokratiefördernde und -schützende Kooperationsformate einzubauen. Es geht darum, demokratische Prinzipien wie Teilhabe, Rechenschaft und Transparenz in ausgewählten politischen Prozessen auf der Mikro- und Mesebene im Wassermanagement sicherzustellen. Die zentralisierte Struktur vieler Wassermanagementsysteme bedingt, dass in der Regel der Grad staatlicher Einbindung hoch ist und somit positive Spillover-Effekte auch in andere Bereiche staatlicher Steuerung möglich sind.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützte vor geraumer Zeit im Rahmen seiner Forschungsförderung zum Integrierten Wasserressourcenmanagement Projekte in nicht-demokratischen Kontexten (Borchardt et al., 2016). Diese Projekte standen wiederholt in der Kritik: Es galt abzuwägen, inwiefern sie autoritäre Regime etwa in Usbekistan, in der Mongolei oder in Jordanien eher stärkten oder schwächten. Stärkten, da Defizite der existierenden Wasserwirtschaft vor Ort über die Projekte erfolgreich ausgeglichen wurden, die erreichten Verbesserungen aber zumeist den nationalen Regierungen und selten der deutschen Bundesregierung zugeschrieben wurden. Gleichzeitig konnte in zahlreichen dieser Projekte gezeigt werden, dass, als Teil der kooperativ durchgeführten Forschung, Räume der Reflexion und des Austauschs zu unterschiedlichen Steuerungsansätzen durch die partizipativen und inklusiven Governanceinstrumente des Integrierten Wasserressourcenmanagements entstanden. Progressive Vertreter:innen konnten die Räume nutzen, um Transparenz, Rechenschaftsablegung und Selbstorganisation und Einbindung zu stärken (Hornidge et al., 2016; Ibsch et al., 2016b). Auch in Nordafrika beobachteten Wissenschaftler:innen im Bereich des Wassermanagements, wie wasserbezogene Kooperation Grundelemente demokratischer Governance stärken konnte (Freyburg, 2012; Houdret, 2021).

beinhaltet in diesem Verständnis Grundlagenforschung genauso wie angewandte und Veränderungsprozesse begleitende Forschung sowie Lehre und Beratung.

Wissenschaft produziert, verbreitet und kontextualisiert Wissen und Expertise zu Wasserkreisläufen und hydrologischen Regimen sowie den vielfältigen Wechselwirkungen zwischen diesen, Ökosystemen und menschlicher Nutzung. Gleichzeitig ist Wissenschaft ein zentraler Baustein in Innovationssystemen, die technologische, institutionelle und soziale Lösungsansätze zur Sicherung der Wasserbedarfe für Menschen und Ökosysteme sowie der Wasserqualität entwickeln. Das Spektrum der Lösungsansätze reicht von Methoden zur Rohstoffrückgewinnung aus dem Abwasser über die innovative Verschränkung von Technik und Natur zum Wassermanagement in Städten, der Entwicklung neuer Methoden landwirtschaftlicher Bodennutzung bis zu neuen Finanzierungs- und Rechtsinstrumenten in der Umweltpolitik. Des Weiteren gilt auch für Wasserforschung zum einen, dass sie erst durch die Verwebung mit Lehre, postgradualer Ausbildung und Nachwuchsförderung sowie dem Austausch mit der Öffentlichkeit und wissenschaftsbasierter Politikberatung ihre Anwendungsorientierung und mögliche Passfähigkeit für den praktischen Kontext des Wassermanagements sicherstellen kann. Zum anderen werden durch die genannten Interaktionen als Teil des Forschungsprozesses die breiteren gesellschaftlichen Expertisenstrukturen, das Bewusstsein und das Detailverständnis ausbildet,

die für die spätere Anwendung der wissenschaftlichen Ergebnisse essenziell sind.

In Kapitel 3 und 4 hat der WBGU herausgearbeitet, dass Verschärfungen im Wasserbereich zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension führen können. Die Wissenschaft spielt eine entscheidende Rolle, um einen angemessenen Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit zu wahren. Dies ist insbesondere auf Grund der durch den anthropogenen Klimawandel bedingten Nichtstationarität hydrologischer Regime von großer Bedeutung.

Das Ende der Stationarität führt zu einer erheblichen Unsicherheit hinsichtlich zukünftiger Niederschläge und Extremereignisse, da aus Erfahrung gewonnene Bandbreiten für Mengen und zeitliche Verteilung von Niederschlägen sowie Häufigkeit und Stärke von Extremereignissen nicht mehr verlässlich und aus Modellen abgeleitete Prognosen über zukünftige Entwicklungen mit Unsicherheiten behaftet sind.

Unsicherheiten bei der Modellierung der hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels können durch die Verbesserung der Datenverfügbarkeit und die Verbesserung sowohl der Klima- als auch der hydrologischen Modelle reduziert werden (Banda et al., 2022). Eine weitere notwendige Reaktion auf die Verschärfungen ist außerdem der signifikante Ausbau des wissenschaftlichen Monitorings von Wasserständen und Entnahmen im Bundesgebiet und in enger Kooperation für ganz Europa und weltweit, um Lücken über Bestandsgrößen

im Wasserhaushalt und im Verbrauch als Planungsgrundlage zu schließen. Dies hilft, sich abzeichnende, gravierende Problemkonstellationen durch Änderungen im hydrologischen Regime und in der Nutzung frühzeitig zu erkennen (Kasten 8.4-1).

Dazu gehören auch die Entwicklung von Szenarien für klimatische, ökologische, sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen und deren Wechselwirkungen untereinander sowie partizipative Bottom-up-Ansätze zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien. Partizipative Bottom-up-Ansätze in der Wissenschaft erlauben Gefährdungen des Wasserdargebots für Menschen und Ökosysteme sowie Risiken durch Extremwetterereignisse frühzeitig zu erkennen. Zudem unterstützen sie die Entwicklung lokal verankerter Lösungsansätze und ermöglichen dadurch robuste, kontextspezifische und flexible Entscheidungsprozesse (UNESCO, 2020).

Auf dieser Basis kann die wasserbezogene Wissenschaft die Politik, Behörden und die Wasserwirtschaft dabei unterstützen, auf die zu erwartenden Veränderungen im Wasserhaushalt sowie die daraus entstehenden größeren Unsicherheiten in Planung und Management von Wasserressourcen zu reagieren. Beispielhaft ist die 2023 abgeschlossene Fördermaßnahme „Regionale Informationen zum Klimahandeln“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Sie hatte zum Ziel, „entscheidungsrelevantes Wissen zum Klimawandel in Kommunen und Regionen aufzubauen und darauf basierend geeignete Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln“ (BMBF, 2021b).

Die durch Nichtstationarität notwendige kontinuierliche Produktion neuen wissenschaftlichen Wissens in Verbindung mit der Erhebung neuer Daten sollte bei allen

Entwicklungen organisationaler, sozialer und technologischer Innovationen zur Sicherung der Wasserbedarfe berücksichtigt werden (Smith et al., 2023). Andernfalls besteht die Gefahr, dass Planung und Entwicklung neuer Lösungsansätze von falschen hydrologischen Annahmen ausgehen und somit für die Umsetzung ungeeignet sind. Der verstärkte Einsatz von digitaler Monitoringtechnologie bei bestehender und geplanter Infrastruktur kann ihre Nutzung vor allem bei Extremereignissen optimieren.

Strukturelle Anforderungen an Wissenschaft: Inter- und Transdisziplinarität

Die Sicherstellung der Wasserbedarfe für Menschen und Ökosysteme sowie die Vermeidung von Verschärfungen verlangen die interdisziplinäre Kooperation von Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften. Eine wichtige Rolle für die Sicherstellung der späteren Einbettung der Wassermanagementansätze in die gegebenen Governance-Systeme spielen Sozial-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften. Ohne deren Integration in Forschungsprojekte ist das Verständnis der komplexen und vielfältigen Weisen des individuellen und gesellschaftlichen Umgangs mit Wasser sowie der darauf aufbauenden Entwicklung von politischen Steuerungsmechanismen nicht möglich. Die wasserbezogene Forschung in den Bereichen der Sozial-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften ist aber nach wie vor oft unterfinanziert. Zudem wird ihnen im Projektdesign häufig eine untergeordnete Rolle zugeordnet und sie sind nicht in die zentralen Entscheidungsprozesse bezüglich Forschungsdesign und -durchführung eingebunden (Martin-Ortega, 2023).

Neben der Interdisziplinarität bedarf es der Verknüpfung von Grundlagen- mit angewandter Forschung sowie

Kasten 8.4-2

Beispiele erfolgreicher Citizen Labs

In Citizen Labs können Bürger:innen aktiv an wissenschaftlichen Forschungsprojekten teilnehmen. Mit Crowdsourcing-Methoden tragen sie dazu bei, Daten zu sammeln und zu analysieren um wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen. Angesichts der Wasserverknappung können mit den Beteiligten sowohl Wassermonitoring-Aufgaben (Wasserverfügbarkeit und -qualität) übernommen als auch Lösungsansätze und Umsetzungsmaßnahmen zur besseren Wasserspeicherung und effizienterem Verbrauch erarbeitet werden. Diese Informationen können zusammen mit Wissenschaft, Stakeholdern und Politiker:innen ausgewertet und genutzt werden (Bonn et al., 2022; Wagenknecht et al., 2021). Durch die Einbindung der Bürger:innen in Entscheidungsprozesse können Citizen Labs, ähnlich wie deliberative Partizipationsprozesse, zu resilienteren Strukturen in Kommunen beitragen, indem sie maßgeschneiderte und

durch transparente Entscheidungen akzeptierte Lösungen für lokale Herausforderungen wie Wasserknappheit aufzeigen.

Im Projekt „Wieviel Wasser speichert mein Boden“ der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg konnten Bürger:innen den Gehalt an grünem Wasser und das Filtrationsvermögen des Bodens in ihrem Garten ermitteln. Unter dem Motto „Klimaschutz und Biodiversität – Welches Potenzial hat mein Garten?“ konnte jede Bürgerin und jeder Bürger lernen, den Beitrag des eigenen Bodens zu steigern (H-BRS, 2019).

Beim Projekt „LassWissen“ im Naturpark Niederlausitzer Heide- und Kulturlandschaft erforschen Expert:innen und Bürger:innen gemeinsam den Wasserhaushalt der Bergbaufolgelandschaft im Lausitzer Revier (Naturpark NLH, 2024). Ziel des Vorhabens ist, mit Bürger:innen ein Datennetz aufzubauen, um den Wasserhaushalt in der Bergbaufolgelandschaft besser zu verstehen. Das Vorhaben wird durch das Programm Kommunale Modellvorhaben zur Umsetzung der ökologischen Nachhaltigkeitsziele in Strukturwandelregionen („KoMoNa“) des Bundesumweltministeriums gefördert (Naturpark NLH, 2024).

der transdisziplinären Erarbeitung von Lösungsansätzen gemeinsam mit Stakeholdern aus Privatwirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Beispielhaft kann dies mit der Rolle der Wissenschaft im klimaresilienten Wassermanagement illustriert werden (Kap. 6). So setzt ein erfolgreiches Management des Landschaftswasserhaushalts die Integration grundlegenden Wissens in die darauf aufbauende, anwendungsorientierte Planung von menschlichen Eingriffen in den Haushalt voraus. Dieses Wissen beinhaltet insbesondere Erkenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Wasserhaushalt und unterschiedlichen Landschaftstypen. Die BMBF Strategie „Wasser: N“ greift beide Aspekte sehr prominent auf (BMBF, 2021a).

Auch der Vergleich unterschiedlicher Lösungsansätze im Rahmen klimaresilienten Wassermanagements vereint Grundlagen- mit anwendungsorientierter Forschung unter Integration relevanter Stakeholder. Die wissenschaftlichen Fähigkeiten zur Prognose lokaler Wasserhaushalte im Hinblick auf den Klimawandel dienen als Grundlage für die Bewertung der zur Verfügung stehenden Lösungen hinsichtlich technischer Machbarkeit, Kosten, gesellschaftlicher Akzeptanz und möglichen Beiträgen zu lokal definierten Zielen und angestrebten Mehrgewinnen. Die Integration von Stakeholdern ist beispielsweise für die Identifikation von Nutzungskonflikten und der Bewertung von Mehrgewinnen unerlässlich (Turkelboom et al., 2021). Beispielhaft vorausschauend ist in diesem Zusammenhang die BMBF Fördermaßnahme „Wasser Extremereignisse“ (WaX), die die Erforschung innovativer Konzepte zu blau-grüner Infrastruktur und deren Management ermöglicht (BMBF, 2024a).

Zusätzlich ist der Einsatz innovativer Forschungsmethoden wie transdisziplinär gestalteter Reallabore, in denen Wissenschaftler:innen mit Vertreter:innen von Zivilgesellschaft, Politik und Praxis gemeinsam forschen und Lösungsansätze entwickeln, vorteilhaft zur Erprobung der Wirkungen und der Akzeptanz klimaresilienter Infrastruktur. So ermöglichen beispielweise Reallabore zum Umbau von Städten je nach Forschungsdesign nicht nur die Erprobung neuer blau-grüner Infrastrukturen. Durch Integration von Stakeholdern gestatten sie auch gegenseitiges Lernen in einem experimentellen und gleichzeitig öffentlichen Raum unter realen Einsatzbedingungen und unterstützen weitergehende gesellschaftliche Veränderungsprozesse (Paton et al., 2021; Kasten 8.4-2). Reallabore bieten sich ebenfalls an, um bestehende Kapazitätsdefizite in Politik, Verwaltung und Wassermanagement-Organisationen praxisnah zu identifizieren und konkrete Ansätze für Kapazitätsaufbau zu entwickeln. Die gemeinsam mit gesellschaftlichen Akteuren konzipierten Vernetzungs- und Transferansätze sind ein guter Ausgangspunkt für die Diffusion von Forschungsergebnissen.

Wissenschaftsbasierte Politikberatung

Zur Vermeidung globaler Wasserkrisen und bei der Auswahl lokaler Anpassungsoptionen kommt Wissenschaft verstärkt eine beratende und begleitende Rolle im Politikprozess zu. Wie bereits oben betont, ist Wissenschaft bei der Entwicklung von Lösungsansätzen, über deren Auswahl und Umsetzung unter Einbindung der Betroffenen entlang demokratischer Grundprinzipien entschieden werden muss, von zentraler Bedeutung. Die Komplexität und Veränderungsgeschwindigkeit der relevanten sozial-ökologischen Prozesse, verschärft durch den Klimawandel, verlangen eine gleichzeitig vorausschauende sowie lern- und anpassungsfähige lokale und globale Wassergovernance. Hierfür ist unabhängige, kritische Wissenschaft als Grundlage jeglicher Beratungstätigkeit unerlässlich. Es gilt, wissenschaftlich basiert mit einem Blick von außen und unbeeinflusst von parteipolitischen oder anderen Interessen geleiteten Machtdynamiken, Politik zu beraten und ihr als „Sparring Partner“ entgegenzutreten. Diese Freiheit der Wissenschaft (GG, Art. 5 III) und die aus ihr hervorgehende Unabhängigkeit im Denken, die Fähigkeit und Bereitschaft als Wahrheiten Akzeptiertes zu hinterfragen, bei gleichzeitiger Verfassungstreue, muss im politikberatenden Prozess bewahrt und immer wieder aufs Neue sichergestellt werden. Dies liegt in der Verantwortung der Wissenschaftsförderer ebenso wie in der Verantwortung der Wissenschaftenden und Politikberatenden. Gleichzeitig braucht wissenschaftsbasierte Politikberatung eine Rezipientenstruktur in Exekutive und Legislative. Rezipientenstruktur meint insitutionalisierte Mechanismen, in denen wasserbezogene wissenschaftlichen Erkenntnisse und Argumente gehört und in den weiteren Politikprozess aufgenommen werden. Dazu gehören systematische Austauschprozesse zwischen Wissenschaft und Politik, über die der gegenseitige Dialog und Expertisenaustausch möglich ist und die Beratungsprodukte der Wissenschaft innerhalb der Ministerien oder des Bundestages systematisch weitergegeben werden. Nur wenn mit den Beratungsprodukten aktiv gearbeitet wird, kann Wissenschaft Entscheidungsprozesse sinnvoll informieren.

Der WBGU spricht sich dafür aus, solche Rezipientenstrukturen auch in den mit Wassermanagement betrauten Ministerien auf Ebene des Bundes weiter auszubauen. Wichtige Anhaltspunkte für die strukturellen Weiterentwicklungen der Rezipientenstrukturen können auch als Teil des Beirätedialogs unter der Trägerschaft der Wissenschaftsplattform Nachhaltigkeit und des Sustainable Development Solutions Networks (SDSN) Germany, finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), erarbeitet werden.

Kapitel 6 macht des Weiteren deutlich, dass für einen angemessenen Umgang mit den Verschärfungen Wasserinfrastruktur und deren Management modularer,

fehlerfreundlicher und flexibler werden müssen. Der Wissenschaft kommt die Rolle zu, die dafür notwendigen reflexiven, lernenden Planungsprozesse zu begleiten, in dem sie die Effektivität der getroffenen Entscheidungen überprüft und gegebenenfalls technologische Alternativen oder neue Handlungsoptionen vorschlägt. Auch die intendierten und nicht intendierten Effekte politischer Entscheidungen sollten wissenschaftlich dauerhaft ermittelt werden, um rascheres Lernen und ggf. schnelle Nachsteuerung zu ermöglichen.

8.4.1.2

Internationale Wissenschaftskooperation für klimaresilientes Wassermanagement

Global unterscheiden sich die Wissenschaftssysteme nach wie vor stark. Es bestehen insbesondere Unterschiede hinsichtlich personeller und finanzieller Ausstattung, Forschungsinfrastruktur, disziplinärer versus thematischer Organisation, den Schwerpunkten in Grundlagen- versus angewandter Forschung sowie der Leistungsfähigkeit. Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung betrugen im Jahr 2021 in Hoheinkommensländern im Schnitt 2,8 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP). In Ländern mittleren Einkommens beliefen sie sich auf zwischen 1,2 und 1,6 % und in Niedrigeinkommensländern auf zwischen 0,2 und 0,5 % des BIP (UIS, 2024). Die Ausgaben beinhalten öffentliche und private Investitionen in Forschung und Entwicklung und die Förderbereiche Grundlagenforschung, angewandte Forschung und experimentelle Entwicklungsprojekte in der öffentlich und privatwirtschaftlich organisierten Wissenschaft, tertiärer Bildung und zivilgesellschaftlichen Organisationen.

Die unterschiedliche Stärke der Wissenschaftssysteme spiegelt sich auch in der geographischen Verteilung von Forschungsausgaben. Der Großteil der weltweiten Forschungsausgaben fällt auf Nordamerika (27,4 %), die Europäische Union (18,7 %) und Ost- und Südostasien (40,4 %). Lateinamerika hat lediglich einen Anteil von 2,7 % und das Subsaharische Afrika lediglich 0,4 % (UNESCO, 2021). Die ungleiche Verteilung der Wissenschaftskapazitäten verstärkt vorhandene Differenzen. Wissenschaftskapazitäten sind ein zentraler Hebel zur Entwicklung lokal angepasster Lösungsansätze im Umgang mit den Verschärfungen und sie nehmen eine wichtige Rolle in nationalen Innovationssystemen ein, die wiederum eine wichtige Rolle bei der Mobilisierung privaten Kapitals spielen.

Wissenschaftskapazitäten sind auch ein zentraler Faktor bei der Integration lokaler Wissensbestände, beispielsweise in Form von Erfahrungswissen lokaler Stakeholder in die Entwicklung und Überprüfung von Lösungsansätzen. Die Stärkung der Möglichkeiten zur gleichberechtigten Wissenschaft ist Voraussetzung, lokal gangbare Transformationspfade zur Vermeidung des

Ausstoßes von Treibhausgasen aufzutun. Wissenschaftskooperationen sind somit ein wichtiges Instrument zum gemeinsamen Umgang mit den in Kapitel 3 beschriebenen Verschärfungen.

Externe, bi- und multilaterale Wissenschaftsförderung kann im Ausbau der wissenschaftlichen Kapazitäten gerade in Mittel- und Niedrigeinkommensländern einen wichtigen Beitrag leisten (Dean et al., 2015; Mormina, 2019; Blicharska et al., 2017). Der International Science Council schätzt, dass weltweit nur 15 % aller Wissenschaftsprojekte in bilateraler und nur 5 % in multilateraler Kooperation durchgeführt werden (ISC, 2021). Gemessen in der Ko-Autor:innenschaft wissenschaftlicher Publikationen sind lediglich 0,6 % Prozent aller Publikationen aus Hoheinkommensländern in Kooperation mit Wissenschaftler:innen aus Niedrigeinkommensländern veröffentlicht worden (Aksnes und Sivertsen, 2023; DUK, 2024).

Bei internationalen Kooperationen sollte darauf geachtet werden, dass sie sich durch hohe Gleichberechtigung der Partner auszeichnen. Ohne Gleichberechtigung kann weder die Nachhaltigkeit der Kooperationen, noch die lokale Passfähigkeit der entwickelten Erkenntnisse, Innovationen oder Managementansätze sichergestellt werden. Somit ist es im Projekt-Design und während der Projektumsetzung wichtig, darauf zu achten, dass Kooperationsländer Mitspracherechte, Eigenverantwortung und substantielle Mittel erhalten. Zur erfolgreichen Entwicklung und dauerhaften Anwendung lokaler Lösungen sollten im ersten Schritt Forschungsagenden und Forschungsfragen gemeinsam entwickelt werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die 2021 begonnene BMBF-Förderlinie „Wassersicherheit in Afrika“ (WASA), die in einem Konsultationsprozess mit Beteiligung von u. a. dem Rat der afrikanischen Wasserministerien sowie den Wasserministerien Angolas, Botsuanas, Namibias, Sambias und Südafrika entwickelt wurde (BMBF, 2024e).

Die gemeinsame Entwicklung einer Forschungsagenda stellt allerdings die ebenso notwendige gleichberechtigte Kooperation innerhalb des Projektzeitraums nicht automatisch sicher (Schwachula, 2019). Die Operationalisierung der Forschungsfragen, die Durchführung und die Auswertung der Ergebnisse sollte genauso in Kooperation mit lokalen Stakeholdern geschehen. Damit Lösungsansätze zur Bewältigung oder Vermeidung von Wasserkrisen den kontextspezifischen Problemlagen gerecht werden und angepasste Lösungsansätze entwickeln können, ist die Integration von indigenem und lokalem Wissen notwendig. Dies setzt voraus, dass vor der Wissensproduktion nach dem möglichen Vorhandensein und der Eignung des Wissens gefragt wird.

Erste Metaanalysen von Anpassungsprojekten im Wassersektor an den Klimawandel machen deutlich, dass beispielsweise in Afrika Maßnahmen mit Inklusion von

indigenem und lokalen Wissen ein höheres Maß an Risikominderung zeigen als Maßnahmen ohne (Filho et al., 2023). Zur Verbreitung und dauerhaften Anwendung von Lösungen sind weiterhin Kommunikation mit der Bevölkerung sowie Training und Weiterbildung der Nutzer:innen und weiterer relevanter Stakeholder notwendig.

Zur Erhöhung lokaler Forschungskapazitäten müssen wissenschaftliche Einrichtungen in Partnerländern beteiligt und mit substanziellen Mitteln zur Schaffung wissenschaftlicher Arbeitsplätze und Forschungsinfrastruktur ausgestattet werden. Darüber hinaus stärken wissenschaftliche Qualifikationsmöglichkeiten und die Bereitstellung von Mitteln für die lokalen Forschungsadministrationen die wissenschaftliche Kapazität vor Ort. Maßnahmen zur Erreichung beider Ziele verstärken sich in der Praxis gegenseitig. Im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Wasserforschung im Nahen und Mittleren Osten“ (MEWAC) war beispielsweise die gemeinsame Antragstellung mit lokalen Partnern Bedingung und die Kooperation mit Unternehmen erwünscht. Partnerländern war es jedoch nur erlaubt, maximal 50.000 € Förderung zu beantragen. Sie konnten somit nur bedingt als gleichberechtigte Partner auftreten (BMBF, 2020). Beispielsweise ist die BMBF-Förderung zweier Kompetenzzentren für Klimawandel und angepasstes Landmanagement in Afrika (BMBF, 2024d). Die Förderung ist seit 2012 mit offenem Ende angelegt und umfasste bis 2024 Mittel in

Höhe von mehr als 250 Mio. €.

Um die Mittel für Forschungskoooperativen zukünftig substantiell zu erhöhen, ist auch eine stärkere Gewichtung von Wissenschaftspolitik in internationalen Foren wie der G20 oder Regionalorganisationen wie dem Verband Südostasiatischer Nationen (ASEAN) oder der Afrikanischen Union (AU) notwendig. Auf diesen Ebenen könnten Mittelflüsse und Arbeitsprozesse zur partnerschaftlichen Entwicklung von Forschungsagenden und notwendiger Forschungsinfrastruktur koordiniert werden sowie regionale Wissenschaftspolitik analog zu der des European Research Councils der EU zum Auf- und Ausbau regionaler Wissenschaftslandschaften gestärkt werden (DUK, 2024; Taylor et al., 2022; Hornidge et al., 2023).

Forschungsförderern kommt in der internationalen Kooperation neben der Gewähr für die Erfüllung der oben genannten Kriterien die Rolle transnationaler systemischer Intermediäre zu. Das heißt, dass geförderte Forschung interaktive Lernprozesse zwischen den beteiligten Wissenschaftssystemen unter Integration aller an der Entstehung von neuem Wissen beteiligten Akteure ermöglicht (Heiberg und Truffer, 2022).

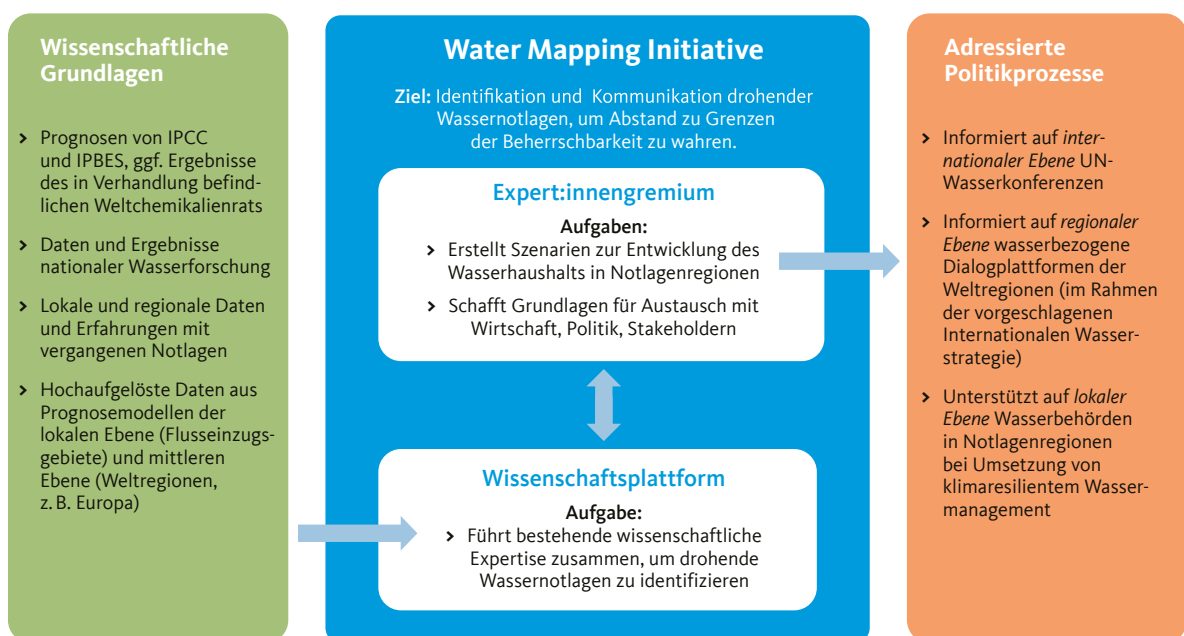


Abbildung 8.4-1

WBGU-Vorschlag für eine Water Mapping Initiative zur Vermeidung regionaler Wassernotlagen. Die Wissenschaftsplattform soll drohende Wassernotlagen durch die Integration wissenschaftlicher Grundlagen möglichst frühzeitig erkennen. Das Expert:innengremium soll auf dieser Basis internationale, regionale und lokale Politikprozesse informieren und unterstützen. Quelle: WBGU

8.4.1.3

Water Mapping Initiative

Die existierende Landschaft für wasserbezogene Wissenschaftskooperation ist einerseits durch eine hohe Fragmentierung und den Vorrang national organisierter Wissenschaftssysteme geprägt, die bestenfalls regional und ausgewählt international kooperieren. Andererseits weisen jüngere Forschungsarbeiten zunehmend auf teils zu erwartende, teils sich bereits entfaltende, regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension hin (Kap. 4). Die Forschung aber steht bezüglich dem potenziellen Ausmaß, der regionalen Verteilung, der Bandbreite ihrer spezifischen Ausprägungen sowie möglicher gesellschaftlicher Reaktionen noch am Anfang.

Gleichzeitig liegen umfangreiche Forschungsergebnisse zum globalen Wasserhaushalt und dessen Veränderungen vor, die trotz zunehmender Relevanz für politische Entscheidungsprozesse weiterhin unzureichend zusammengeführt und in Wert gesetzt werden. Um der Kluft zwischen Wissen und Handlung entgegen zu wirken, spricht sich der WBGU für die Gründung und international geteilte Planung und Umsetzung einer „Water Mapping Initiative“ aus. Sie soll vorausschauend drohende regionale Wassernotlagen erkennen und mit den Ergebnissen ihrer Arbeit Entscheidungsprozesse informieren. Auf diese Weise kann die Initiative dazu beitragen, den Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit einzuhalten.

Wissenschaftliche Arbeitsgrundlagen

Wassernotlagen frühzeitig zu erkennen und regional angemessen eingrenzen oder Pläne zum entsprechenden Umgang entwickeln zu können, bedarf der Zusammenführung globaler Wasserdatenreihen und Monitoringkapazitäten (Abb. 8.4-1). Dies umfasst Langzeitdatenreihen, Monitoring- und Beobachtungsdaten aus nationalen Monitoringeinrichtungen genauso wie zeitlich begrenzte, interdisziplinär vielfältige quantitative und qualitative Datenbasen aus regionalen und nationalen Forschungsvorhaben. Hier gilt es, verbindliche Standards für entsprechendes Wasser-Monitoring weltweit zu etablieren. Diese Standards für Datenerhebung, -aufbereitung und -speicherung würden nicht nur die Wissensgrundlage bzgl. globaler Wasserverfügbarkeit (grünes und blaues Wasser) schaffen. Sie könnten auch deren Weiterentwicklung ermöglichen und sie in die Operationalisierung der weitestgehend national oder regional organisierten Wissenschaftssysteme weltweit zu integrieren (WBGU, 2023).

Wissenschaftsseitig müsste die Plattform weiterhin die Erkenntnisse zu den Folgen des Klimawandels, des Biodiversitätsverlusts und der Umweltverschmutzung mit Daten und Erfahrungen zu vergangenen Notlagen, den Ergebnissen nationaler und überregionaler Wasserforschung sowie lokalen Daten und lokalen Erfahrungen

aktueller Notlagen integrieren. Dazu kommen hoch aufgelöste räumliche und zeitliche Daten aus Beobachtungen und Prognosemodellen auf lokaler Ebene (Flusseinzugsgebiete), auf nationaler bzw. regionaler Ebene (auf Ebene der Weltregionen, z. B. durch EU Copernicus) sowie auf globaler Ebene (z. B. IPCC und IPBES). Mit zunehmender zeitlicher und räumlicher Auflösung sollte die Plattform auch relevante Informationen für lokale Wasserbehörden zur Umsetzung eines klimaresilienten Wassermanagements bereitstellen. Für erfolgreiche Prognosen sollten die Daten sowohl retrospektiv (hindcasting) als auch prognostisch modellierend, unter Berücksichtigung verschiedener Klimamodelle ausgewertet werden. Sobald das von der UN-Umweltversammlung beschlossene Science-Policy Panel für Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung seine Arbeit aufgenommen hat (Kap. 7.1.3.2), sollen seine Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden.

Wissenschaftliches Expert:innengremium

Zur Aufsicht und Steuerung der Plattform soll ein Expert:innengremium eingerichtet werden, dem folgende weitere Aufgaben obliegen: die Entwicklung verbindlicher Standards und Indikatoren für das notwendige Wassermonitoring weltweit, die Bewertung der Datenauswertung und grafischen Darstellungen sowie die Aufbereitung der Arbeitsergebnisse zur Einspeisung in politische Prozesse. Sind drohende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, soll das Expert:innengremium außerdem Prognosen für gefährdete Regionen erstellen. Parallel könnte das Expert:innengremium den Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Politik und Stakeholdern befördern.

Auf internationaler Ebene soll das Expert:innengremium die UN-Wasserkonferenzen informieren. Auf regionaler Ebene sollte die Initiative wasserbezogene Dialogplattformen in unterschiedlichen Weltregionen sowie in unterschiedlichen Länderverbünden (z. B. G20, BRICS, OECD, Commonwealth of Nations, MIKTA – eine Konsultations- und Koordinierungsplattform zwischen Mexiko, Indonesien, Südkorea, der Türkei und Australien) und Regionalebene (EU, ASEAN, AU, MERCOSUR, etc.) Politikdialoge für die Ausgestaltung einer Internationalen Wasserstrategie mit Blick auf die UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 anregen und informieren. Lokal soll das Gremium auch mit Wasserbehörden bei der Umsetzung von klimaresilientem Wassermanagement kooperieren.

Für die lokale, nationale und regionale Strategieentwicklung und -umsetzung soll das Expert:innengremium ebenfalls die notwendige wissenschaftlich-basierte Expertise zu voranschreitenden Veränderungen in der Verfügbarkeit von Wasser weltweit und mit den jeweiligen regionalen und lokalen Besonderheiten bereitstellen. Die Gestaltung von darauf aufbauenden Dialog- und

Kooperationsprozessen würde jedoch über die Kapazitäten der Initiative hinausgehen und sollte stattdessen in der Verantwortung von Nationalstaaten und Regionalverbünden liegen. Die Wissenschaftsplattform und das Expert:innengremium sollten institutionell bei UN Water angesiedelt sein. Das Hosting der Datenbanken und die wissenschaftliche Auswertung sollte bei international beauftragten nationalen Forschungseinrichtungen erfolgen. Die Einrichtung könnte ähnlich den Datenzentren von IPCC und IPBES erfolgen.

Die Finanzierung sollte idealerweise vor allem durch G7 und G20 Länder gewährleistet werden. Weitere Länder sollen sich auf freiwilliger Basis beteiligen können. Eine Co-Finanzierung aus Mittel- und Hoheinkommensländern ist gerade vor dem Hintergrund der zunehmenden globalen Vertrauenskrise zwischen „Süd“ und „Nord“ wichtig und könnte auch die Wahrnehmung der Wissenschaft als Faktor in internationalen Verhandlungen stärken.

Einer Delegitimierung der Wasserszenarien der Initiative aufgrund einer möglichen Wahrnehmung als „westliche Wissenschaft“ und die damit verbundenen Entwertung für den politischen Prozess muss bereits durch die Architektur der Initiative entgegengewirkt werden. Für die Zusammensetzung des wissenschaftlichen Stabs und die Durchführung wissenschaftlicher Aktivitäten sollten die gleichen Anforderungen gelten, wie für die in Kapitel 8.4.1.2 beschriebenen internationalen Wissenschaftskooperationen. Wissenschaft sollte inter- und transdisziplinär organisiert sein sowie von Wissenschaftler:innen aus Hoch-, Mittel- und Niedrigeinkommensländern zu gleichen Teilen durchgeführt werden.

8.4.2 Bildung

Bildung ist für den Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft im Allgemeinen sowie für die Vermeidung von Wasserkrisen in Speziellen essenziell. Maßnahmen wie Information, Aufklärung, die Aneignung von Wissen durch praktische Erfahrung und öffentlicher Dialog stärken das Bewusstsein für die Bedeutung der Ressource Wasser. Ein besseres Verständnis von etwa den Zusammenhängen wie zwischen Güterproduktion und Wasserqualität, den neuen Herausforderungen im Wassermanagement durch den Klimawandel oder globaler Governance ermöglichen selbstbestimmtes Handeln und informierte Beteiligung an Politikprozessen.

Bildung vermittelt das notwendige Wissen zum individuellen Aufbau von Kompetenzen, die zielgerichtetes Handeln im Sinne nachhaltiger Entwicklung und ein Leben im Einklang mit der Natur ermöglichen. Dazu fördert Bildung das Bewusstsein für die Ressource Wasser. Die notwendige Veränderung von Bildungseinrichtungen und

-inhalten zum Thema Wasser orientiert sich am Konzept der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE). BNE unterstützt die Fähigkeit zur Kritik bisheriger Bildungsformen und fordert eine integrative Perspektive auf Problemstellungen und gesellschaftliches Handeln. Bildung im Sinne von BNE vermittelt systemisches Denken und die Fähigkeit, menschliches Handeln auf ökologische, soziale und ökonomische Wirkungen integrativ und eigenständig zu reflektieren sowie durch Partizipation unterschiedliche Wissensbestände zu integrieren (WBGU, 2023). Die Bedeutung des Themas spiegelt sich unter anderem im Nationalen Aktionsplan BNE der Nationalen Plattform „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ sowie der BNE-Kampagne „Lernen. Handeln. Gemeinsam Zukunft gestalten. Bildung für nachhaltige Entwicklung“, die beide unter Leitung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung stehen (BMBF, 2017).

Obwohl die Bedeutung von Bildung für kritisches Denken sowie den Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft grundsätzlich unumstritten ist, hat das Konzept BNE auch Kritik erfahren. Schon länger stellt die empirische Sozialforschung fest, dass das Bewusstsein über Umweltkrisen wächst, zu den Umweltkrisen beitragende Verhaltens- und Konsummuster sich aber wenig ändern. Wurde der „Knowledge to Action Gap“ anfangs primär mit mangelnder Langfristplanung und Risikoaversität erklärt (etwa WBGU, 2011), unterstreichen jüngere Kritiken, dass nachhaltiges Handeln seine Grenzen in nicht nachhaltigen materiellen und institutionellen Infrastrukturen findet. Diese lassen sich nicht durch Wissens- und Kompetenzzuwachs, sondern nur über politische Prozesse verändern. Die Notwendigkeit demokratisch legitimer politischer Beschlüsse zur Einleitung gesellschaftlicher Veränderungen als Voraussetzung für erfolgreiches umweltorientiertes Handeln, so die Kritik weiter, werde aber im Kontext der BNE weitgehend ausgeblendet (Christ und Sommer, 2023). Hieraus ergibt sich für BNE, dass der Zusammenhang zwischen Handeln ermöglichenden Rahmenbedingungen und individuellem Handeln sowie die Bedeutung demokratisch legitimer politischer Entscheidungen zu deren Veränderung stärker in die vermittelten Inhalte integriert werden müssten.

Wasser war und ist als zentrales globales und lokal relevantes Thema schon immer Teil von BNE (Rieckmann, 2020). Die Nationale Wasserstrategie umfasst weitreichende Maßnahmen zu Kommunikation, Bildung, Weiterbildung und Beratung, deren Umsetzung der WBGU unterstützt. Geplant sind unter anderem eine umfassende Kommunikationsstrategie, Weiterbildungsangebote für Fach- und Führungskräfte unterschiedlicher Sektoren und politische Entscheidungsträger:innen sowie die Stärkung des Themas Wasser in Schulen (BMUV, 2023b). Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt seit längerer Zeit Weiterbildungen zum Thema Wasser im

Rahmen von Fördermaßnahmen zur Forschung. So fördert etwa die Maßnahme „GRoW – Globale Ressource Wasser“ Aus- und Weiterbildungsprogramme zur Verbesserung der Bewirtschaftung von Wasserressourcen (BMBF, 2024c). Die in Kapitel 3 beschriebenen Verschärfungen sowie die in Kapitel 4 beschriebenen drohenden regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension rechtfertigen allerdings, dem Thema noch mehr Aufmerksamkeit zuzuweisen.

8.5

Handlungsempfehlungen

Es folgen Handlungsempfehlungen, um eine internationale Wassergovernance zu stärken (Kap. 8.5.1), die Schnittstellen sowie Chancen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen nutzt und die Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens verbessert. Die anschließenden Handlungsempfehlungen zielen darauf ab, das Zusammenspiel von gestaltendem Staat und zivilgesellschaftlicher Selbstorganisation zu fördern (Kap. 8.5.2) sowie höhere Investitionen in den Schutz von Wasserressourcen und resiliente Wasserinfrastrukturen anzuregen (Kap. 8.5.3). Das Kapitel schließt mit Empfehlungen für eine proaktive Rolle der Wissenschaft, die Akteure und Stakeholder zusammenbringt (Kap. 8.5.4).

8.5.1

Internationale Wassergovernance stärken

Auf internationaler Ebene schlägt der WBGU vor, neue Impulse durch eine Internationale Wasserstrategie zu setzen, die anschlussfähig an bisherige internationale wasserpolitische Prozesse sein sollte. Deutschland, die EU sowie Unternehmen mit transnationalen Lieferketten sollten ihrer internationalen Verantwortung nachkommen.

8.5.1.1

Wasserdiplomatie auf internationaler und regionaler Ebene voranbringen

Eine Internationale Wasserstrategie als neuer Impuls für die internationale Wasserdiplomatie

Der WBGU empfiehlt die Entwicklung einer internationalen Wasserstrategie. Diese sollte als Austausch- und Koordinierungsplattform dazu beitragen, die aktuellen Prozesse institutionell zu verstetigen. Inhaltlich sollte sie zunächst die am wenigsten kontroversen Themen adressieren und zur Steigerung der Konsensfähigkeit auf unverbindliche Instrumente setzen. Trinkwasser, Integration, Bildung und Forschung sowie Kooperation sollten prioritär behandelt werden. Zudem sollte die Internationale Wasserstrategie helfen, grünes Wasser und seine

mögliche völkerrechtliche Regulierung zu adressieren und eine bessere Verzahnung der Wasserkonventionen mit weiteren wasserrelevanten völkerrechtlichen Verträgen anstreben. Schließlich sollte der Schutz der Ressource Wasser als Gegenstand gemeinsamer Sorge der Menschheit (*common concern of humankind*) anerkannt werden.

Neues Wassersekretariat und wissenschaftliches Expert:innengremium zur Verstetigung regelmäßiger UN-Wasserkonferenzen

Der WBGU empfiehlt die Einrichtung eines UN-Wassersekretariats, das zukünftig durch den Sondergesandten für Wasser (special envoy) geleitet werden könnte sowie ein wissenschaftliches Gremium, das dieses beratend unterstützt. Das wissenschaftliche Gremium soll bezüglich der Herkunftsländer sowie der fachlichen Expertisen divers zusammengesetzt sein. Es sollte mit der ebenfalls vom WBGU empfohlenen Plattform der Water Mapping Initiative (Kap. 8.5.4) zusammenarbeiten.

Aufbau von Kapazitäten unterstützt durch eine international finanzierte Task Force

Die Datenanalysekapazitäten von Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sollen gefördert werden und relevante Wasserdaten möglichst frei zugänglich gemacht werden (open access). Behörden in allen Ländern sollen in der Lage sein, ihre Wasserpolitik so zu planen und zu kalkulieren, dass diese nicht mehr auf Annahmen der Stationarität beruht. Nur wenn die Kapazitäten in den Ländern vor Ort aufgebaut werden, kann klimaresiliente Planung auch umgesetzt werden. Niedrigeinkommensländer sollten finanzielle Unterstützung und Beratung erhalten, z. B. durch eine international finanzierte Task Force.

Regionale Ebene und Regionalorganisationen fördern: Einrichtung von Regionalplattformen im Rahmen einer Internationalen Wasserstrategie

Um regionale Organisationen zu stärken, könnten im Rahmen einer Internationalen Wasserstrategie regionale Governanceplattformen für multilaterale Treffen eingerichtet werden. Das Sendai-Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge kann als Vorbild dienen (Kasten 8.1-3). Mittels regionaler Plattformen könnten Ziele und Maßnahmen für regionale Wasserstrategien formuliert werden, die u. a. Fragen der Landnutzung thematisieren (WBGU, 2020). Der Umgang mit Waldflächen mit überregionaler Bedeutung, wie z. B. dem Amazonasregenwald, könnte in regionale Strategien aufgenommen werden, z. B. für Südamerika. Schutzmaßnahmen könnten zudem durch internationale Finanzierung oder internationale Kooperation gefördert werden. In Europa könnte eine regionale Wasserstrategie auf den Europäischen Green Deal sowie die Europäische Biodiversitätsstrategie Bezug nehmen. Im Rahmen der vorgeschlagenen Internationalen

Wasserstrategie würden die regionalen Governanceplattformen durch die Water Mapping Initiative wissenschaftlich informiert werden.

Europäischer Blue Deal

Angesichts zunehmender Extremwetterereignisse innerhalb Europas und der Glaubwürdigkeit der EU als Akteur in internationalen Verhandlungen sollten die bisherigen Anstrengungen zur Integration einer klimaresilienten Europäischen Wasserpolitik, z. B. der EU Blue Deal des EESC und die Initiative für Wasserresilienz der EU-Kommission, weiterverfolgt und mit Priorität behandelt werden. Deutschland sollte sich dafür einsetzen, dass der Europäische Green Deal, bzw. der Clean Industrial Deal, durch einen Europäischen Blue Deal ergänzt wird.

Multilaterale Kooperationsgemeinschaften

Um die Kooperation bezüglich nachhaltigem Land- und Wassermanagement zu stärken, schlägt der WBGU multilaterale Kooperationsgemeinschaften für „Koalitionen der Willigen“ vor. Diese könnten drei Funktionen für ihre Mitglieder erfüllen: (1) integrierte Ansätze zu Wasser- und Landnutzung über Staatsgrenzen hinweg umsetzen und sich dabei über Anwendungswissen (know how) austauschen, (2) auf internationaler und regionaler Ebene für eine transformative Land- und Wassergovernance eintreten und (3) über kooperative Mechanismen gemeinsam wertvolle Ökosysteme schützen (WBGU, 2020: 296).

8.5.1.2

Schnittstellen stärken und nutzen

Stärkung von Kapazitäten an den Schnittstellen für eine aktive Rolle in der Internationalen Wasserstrategie

Dem erhöhten Koordinationsbedarf auf nationaler und globaler Ebene sollte durch eine Erhöhung von Kapazitäten der Verwaltung begegnet werden. Die Kapazitäten von Verwaltungen auf supra-, staatlicher und substaatlicher Ebenen, die bereits jetzt an Schnittstellen arbeiten und über wasserspezifische Netzwerke und Erfahrungswissen verfügen, sollten so ausgebaut werden, dass sie eine aktive Rolle in der Aushandlung von einer Internationalen Wasserstrategie einnehmen können, wie sie der WBGU vorschlägt. Um dies zu erreichen, sollten die finanziellen und personellen Ressourcen von (Ministerial-) Verwaltungen erhöht werden, die zu wasserbezogenen Themen arbeiten, z. B. in den Bereichen Landwirtschaft, Wirtschaft und Handel, Umwelt, Außenpolitik sowie nachhaltige Entwicklung.

Biodiversitätsgovernance durch integrierte Ansätze

Für die Umsetzung der Ziele des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal (GBF) empfiehlt

der WBGU den integrierten Mosaikansatz – basierend auf dem integrierten Landschaftsansatz – sowie die Umwidmung von Subventionen (WBGU, 2020, 2024). Die Umsetzung der Flächenziele des GBF sollte als Chance genutzt werden, Landschaftswasserhaushalte zu stabilisieren und die Speicherfähigkeit der Landschaft wiederherzustellen (Kap. 7.2).

Wassergovernance und Biodiversitätsschutz verbinden: das Beispiel schwindender Gletscher

Das Abschmelzen von Gletschern in Folge des Klimawandels führt zur Entstehung neuer Ökosysteme. Der Schutz dieser neuen postglazialen Ökosysteme könnte einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die globalen Biodiversitätszielen des GBF zu erreichen. Bis 2100 können dadurch neue aquatische und terrestrische Ökosysteme von bis zu einer Größe der Fläche Finnlands entstehen (Bosson et al., 2023). Die neu entstehenden Ökosysteme können z. B. eine Rolle als Kohlenstoffsinken spielen und in einigen Regionen Gletscherschmelzwasser zurückhalten. Da diese Gebiete bisher für den Menschen nicht zugänglich waren, der Nutzungsdruck aber bereits jetzt ansteigt, z. B. durch Infrastrukturentwicklung, sollten diese Ökosysteme möglichst früh unter Schutz gestellt werden.

Wasser als eigene Komponente im Ziel der Klimaanpassung und Klimafinanzierung integrieren und konkretisieren

Deutschland sollte sich dafür einsetzen, das wasserbezogene globale Anpassungsziel, welches bereits 2023 auf der Klimakonferenz in Dubai (COP 28) beschlossen wurde, weiter zu konkretisieren (UNFCCC, 2023b). Die Finanzierung von klimaresilientem Wassermanagement sollte eine zentrale Rolle bei der Verhandlung des neuen Klimafinanzierungsziels des Pariser Übereinkommens spielen.

8.5.1.3

Chancen von Wirtschafts- und Handelsbeziehungen nutzen

Schutz von Wasserressourcen in der WTO und regionalen Handelsabkommen stärken

Der Schutz von Wasserressourcen sollte in der WTO, in regionalen Handelsabkommen sowie in Investitionsschutzabkommen gestärkt werden. Unter anderem sollte Deutschland sich für die Wiederaufnahme der Verhandlungen unter dem Environmental Goods Agreement über den Abbau tarifärer und nicht tarifärer Hemmnisse im Handel mit Umweltgütern und -dienstleistungen einsetzen, im Kontext Wasser z. B. Technologien zur Behandlung von Abwasser, zur Verbesserung der Wasserproduktivität oder dürreresistenten Getreidesorten. Auch sollte

angestrebt werden, dass WTO-Recht und regionale und bilaterale Abkommen Länder in der Einführung und Umsetzung von Maßnahmen bestärken, die dem Schutz von Wasserressourcen dienen oder ihnen hierbei zumindest ausreichenden Handlungsspielraum gewähren, z. B. durch klar definierte Ausnahmetatbestände. Sinnvoll kann auch die Vereinbarung von Schutzmaßnahmen (Safeguards) sein, welche unilaterale Beschränkungen des freien Handels zum Schutz von Wasserressourcen in dringenden oder schwerwiegenden Fällen ermöglichen. WTO-Recht wie regionale Handelsabkommen sollten den Abbau von Subventionen, welche dem Schutz von Wasserressourcen zuwiderlaufen, und Ausnahmen für förderliche Subventionen vorsehen (Zengerling, 2020; WBGU, 2020; GCEW, 2023b). Entsprechende Zielsetzungen in internationalen Abkommen finden sich z. B. für den Schutz von Biodiversität im GBF (CBD, 2024). Regionale Handelsabkommen sollten z. B. durch Zertifizierungen gezielt den regionalen und internationalen Handel mit nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen und den Aufbau entsprechender Geschäftsmodelle stärken (Zengerling, 2020). In regionalen Abkommen vereinbarte Regelungen sollten von möglichst vielen Ländern für ihre Handelsbeziehungen übernommen werden, um eine Verlagerung negativer Umweltauswirkungen in Länder außerhalb der Abkommen zu vermeiden.

Unternehmen international stärker in die Verantwortung nehmen und Länder bei der Einführung von Berichtspflichten unterstützen

Die in der deutschen Nationalen Wasserstrategie formulierten Ziele und Maßnahmen können für weitere Länder als Vorbild dienen. Im Rahmen der Internationalen Wasserstrategie sollten weitere Länder ermutigt und befähigt werden, Berichtspflichten zu Wassernutzung und -risiken einzuführen und dabei möglichst einheitliche Standards zugrunde zu legen. Basierend auf dieser Berichterstattung sollten Unternehmen und Investoren dazu angehalten werden, Maßnahmen zu ergreifen, um negative Auswirkungen ihrer Aktivitäten auf Wasserressourcen zu vermeiden. Bei der Einführung von Berichtspflichten sollten zudem Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen unterstützt werden, z. B. durch kapazitätsbildende Maßnahmen (Kap. 8.1.3.3).

Verankerung des Schutzes von Wasserressourcen und der Erfassung von Risiken in Lieferkettengesetz prüfen

Deutschland sollte prüfen, inwieweit der Schutz von Wasserressourcen und die Erfassung von Wasserrisiken stärker in das deutsche Lieferkettengesetz integriert werden können. So werden z. B. Risiken für Ökosysteme und Biodiversität bisher nicht erfasst. Zu bedenken sind möglicherweise eingeschränkte Datengrundlagen und die

Methodik für die Erfassung sowie der mit der Erfassung verbundene Aufwand für Unternehmen.

Zertifizierungsprogramme prüfen und weiterentwickeln

Es sollte geprüft werden, inwieweit bestehende Zertifizierungsprogramme im Design und in der Implementierung verbessert werden können, oder ob neue Zertifizierungen entwickelt werden sollten, um einen nachhaltigen Umgang mit Wasser stärker zu fördern. Relevant sind hier beispielsweise auf EU-Ebene das Ecolabel, in Deutschland der Blaue Engel für Produkte und Dienstleistungen oder auch der Water Stewardship Standard der Alliance for Water Stewardship, welcher Unternehmen auszeichnet. Bei einer Weiter- oder Neuentwicklung ist darauf zu achten, dass auch Produzent:innen in Niedrigeinkommensländern von der Teilnahme an Zertifizierungsprogrammen profitieren, durch höhere Erzeugerpreise oder unterstützende Maßnahmen z. B. zur Kapazitätsentwicklung (WBGU, 2020).

8.5.1.4

Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens

Politikkohärenz nach innen und außen

Deutschland und die EU sollten Politikkohärenz zwischen den verschiedenen externen sowie zwischen den externen und internen Politikfeldern mit Wasserbezug herstellen. Dies ist insbesondere für Europas und Deutschlands Glaubwürdigkeit international sowie beim Ausbau von strategischen Allianzen mit Ländern auf allen Kontinenten und aller Einkommensgruppen, und somit für Europas Handlungsfähigkeit auf internationaler Ebene, von großer Bedeutung.

Vertrauensbildende Maßnahmen in der Zusammenarbeit mit Partnern

Bei der Unterstützung vertrauensbildender Maßnahmen, insbesondere in Konfliktgebieten, ist es wichtig, auf Vertrauen, institutionelle Kapazitäten und einen nachhaltigen Dialog zu achten, und sich nicht nur auf technologische Lösungen und Datenverfügbarkeit zu fokussieren. Allzu oft wird materiellen Infrastrukturprojekten Vorrang eingeräumt. Schwieriger ist es, Normen, Denkmuster und Gewohnheiten zu ändern. Notwendig ist daher ein Fokus auf vertrauensfördernde Maßnahmen in Institutionen, langfristige Partnerschaften und einen echten Dialog mit den Partnern – auch bei der Finanzierung von Forschungsprojekten.

Förderung von gendersensiblen Wassermanagement

In der internationalen Zusammenarbeit sollte sichergestellt werden, dass mit großen und kleinen Wassernutzer:innen

kooperiert wird, beispielsweise mit der industriellen Landwirtschaft genauso wie mit kleinbäuerlichen Betrieben, und bei Projektentwicklungen auf geschlechtsspezifische Rollenverteilungen geachtet wird. So ist beispielsweise die flächenintensive Landwirtschaft und Produktion für den Export in vielen Ländern männlich dominiert, während die Gemüse- und Obstlandwirtschaft für die lokale Ernährungssicherung und -vielfalt kleinskalig und in weiblicher Hand ist. Entsprechend gilt es, internationale Kooperation und auch Wissenschaftskooperationen im Bereich nachhaltigen Wassermanagements so zu gestalten, dass insbesondere Frauen befähigt werden ihre (oftmals kleinskaligen) landwirtschaftlichen Aktivitäten zu sichern, anzupassen und weiterzuentwickeln.

Weitere Forschung bedarf es zudem zu Chancen und Barrieren der Umsetzung von WASH-Maßnahmen, die einen universellen sicheren und effizienten Zugang zu Wasser- und Sanitärversorgung gewährleisten sollen, sich positiv auf die menschliche Gesundheit auswirken, Armut und Ungleichheit verringern und die Sicherheit von Mädchen und Frauen verbessern (UNWC, 2023).

Wasserbezogene Kooperation mit Ländern niedrigen und mittleren Einkommens ausbauen, Vermarktungssysteme fördern

Länder niedrigen und mittleren Einkommens sollten durch Kapazitätsaufbau und technische Zusammenarbeit darin unterstützt werden, die Potenziale internationaler Handels- und Wirtschaftsbeziehungen für Wachstum, Entwicklung und Ernährungssicherheit zu nutzen und zugleich heimische Wasserressourcen vor negativen Spillover-Effekten zu schützen. Hierbei sollten auch subnationale und unternehmerische Kooperationen gefördert werden. Zudem sollten lokale und regionale Märkte und Vermarktungssysteme für Nahrungsmittel gestärkt werden, um Alternativen zum Anbau wasserintensiver Monokulturen wie Mais und Soja für den Export zu schaffen. Hierbei könnte der Welternährungsausschuss (CFS) in Kooperation mit der Welthandelsorganisation (WTO) eine koordinierende Rolle einnehmen. Besonders kleinbäuerliche Organisationen sollten gehört und eng miteinbezogen werden (Tups, 2022).

Spillover-Effekte erfassen, Fehlanreize abbauen und Umstellung auf wassersparende Wirtschaftsmodelle fördern

Handelsbeziehungen der EU sollten gezielt auf transregionale Spillover-Effekte im Wasserbereich untersucht werden. Fehlanreize, die Spillover-Effekte begünstigen (beispielsweise aus Regelungen in Handelsabkommen oder durch Fernwirkungen europäischer Regulierung) sollten abgebaut werden. Handelsbeziehungen sollten genutzt werden, um die Umstellung auf wassersparende Produktions- und Anbaumethoden oder alternative

Einkommensquellen zu fördern.

8.5.2 Staatliche Gestaltung und zivilgesellschaftliche Selbstorganisation

Klimaresiliente Wassergovernance erfordert aus Sicht des WBGU das Zusammenspiel zwischen einem gestaltenden Staat und selbstorganisierten Akteuren. Es sollte kontextspezifisch aufgestellt sein und eine effektive Umsetzung ermöglichen. Die Vorbereitung auf zukünftige wasserbezogene Herausforderungen einer bisher ungekannten Dimension erfordert hierbei der Kooperation und Verständigung zwischen staatlichen, sub- und nicht staatlichen Akteuren.

Gestaltender Staat

Der Staat sollte eine aktive, gestaltende Rolle im Bereich der Wassergovernance einnehmen. Um dem Vorsorge- und Verursacherprinzip gerecht zu werden, bedarf es demokratischer Prozesse, um Strategien und Instrumenten für Wasserpolitik auszuhandeln, zu konzipieren und umzusetzen. Die Zusammenarbeit mit multiplen Akteuren ist wichtig („mit und nicht gegen die Gesellschaft“), dies darf aber nicht bedeuten, dass sich der Staat zurückzieht und sich passiv gegenüber den Herausforderungen der Wassergovernance verhält. Der WBGU empfiehlt eine Erhöhung von administrativen Kapazitäten und Ressourcen, sodass Staaten ihre Rolle und Verantwortung angemessen wahrnehmen können.

Förderung von Selbstorganisation und Bottom-up-Strukturen im IWRM-Kontext

Insbesondere in Weltgegenden, die stark von Verschärfungen wasserbezogener Probleme betroffen sind (Kap. 4), spricht sich der WBGU für die gezielte Förderung von Strukturen aus, die Selbstorganisation auf lokaler und regionaler Ebene ermöglichen (bottom-up), mögliche Schwachstellen der formellen und häufig von staatlicher Hand gestalteten Wassergovernance ausgleichen, gleichzeitig aber auch auf diese hinweisen und ihre Behebung im formellen System sicherstellen. Die Förderung von bottom-up betriebener Selbstorganisation, gerade auch entlang der IWRM-Prinzipien, hat sich in der Vergangenheit auch im Ausbau partizipativer und inklusiver Formen der Entscheidungsfindung bewährt. Gerade in Zeiten zunehmender Autokratisierungsprozesse auf politischer Ebene in der Mehrheit der Länder weltweit, ist diese Förderung inklusiver Governanceansätze auf lokaler Ebene und im vermeintlich apolitischen Feld des Wassermanagements wichtig und erfahrungsgemäß vielversprechend.

Systemische Perspektive weiterentwickeln und Zusammenspiel staatlicher und selbstorganisierter Governance fördern

Eine explizit systemische Perspektive auf Wassergovernance und -management, die sowohl die unterschiedlichen Governanceebenen, als auch die unterschiedlichen Akteursgruppen involviert und staatliche und selbstorganisierte Wassergovernance als Teil ein und desselben Wassermanagementsystems würdigt, ermöglicht die sukzessive Weiterentwicklung des Systems insgesamt. Fragmentierungen, Reibungsverluste und dem Management entgegenwirkende unklare Zuständigkeiten können durch eine bewusste Förderung des Zusammenwirkens von bottom-up und top-down implementierter Wassergovernanceansätze abgebaut werden. Effizienz und Nachhaltigkeit des Wassermanagements können verbessert werden.

Dialogforen fördern um Konflikten vorzubeugen und eine kollektive Lösungssuche zu ermöglichen

Wer WBGU empfiehlt Dialogforen zu Wasser, um Wasserkonflikten zwischen verschiedenen Akteuren vorzubeugen. Dies fördert die demokratisch gelebte Praxis und trägt innerhalb von Ländern und international zur Friedenssicherung bei. Dialogforen bieten zudem die Chance, diverse Wissensformen und Akteure in die Lösungssuche einzubinden. Partizipation auf lokaler Ebene ist eine wichtige Komponente von polyzentrischer Wassergovernance und unterstützt die Vernetzung und Selbstorganisation der Akteure.

8.5.3 Finanzierung mobilisieren und vermitteln

Die Umsetzung wasserbezogener Ziele erfordert umfangreiche Investitionen, so dass dem Finanzsektor eine wichtige ermöglichende Rolle zukommt. Für eine nachhaltige Finanzierung wasserbezogener Investitionen sind nach wie vor eine Erhöhung der Effizienz und Kreditwürdigkeit von Wasserversorgern sowie der Attraktivität des Sektors insgesamt und des jeweiligen Marktumfelds (z. B. lokaler Finanzmärkte) von zentraler Bedeutung. Dazu gehört der Aufbau von Kapazitäten (capacity building) bei öffentlichen Unternehmen und Institutionen für effiziente Planung, Investitionen und Betrieb bzw. für Aufsicht und Regulierung. Strategien der Weltbank (Khemka et al., 2023) und des BMZ (2017) sowie die deutsche Nationale Wasserstrategie (BMUV, 2023b) verfolgen diese Ziele bereits. Die folgenden Handlungsempfehlungen heben daher vor allem Aspekte heraus, die bisher noch weniger Aufmerksamkeit bekommen, und auch Lenkungswirkung hin zu einem klimaresilienten Wassermanagement haben. Die Empfehlungen sind entsprechend der drei

Hauptthemen von Kap. 8.3 gruppiert. Entsprechende Forschungsempfehlungen folgen in Kap. 8.6.3.

8.5.3.1 Investitionsbereitschaft erhöhen, Finanzierungskosten senken: bessere Transparenz über wasserbezogene Risiken

Stärkung der Nachhaltigkeitsberichterstattung durch Harmonisierung, Unterstützung und Datenbereitstellung

Die Bundesregierung sollte die Berücksichtigung wasserbezogener Risiken in Investitionsentscheidungen bei nationalen und internationalen Unternehmen, Investoren und bei Kommunen vorantreiben, um eine Umlenkung von Kapitalströmen in die Erhaltung von Wasserressourcen, ressourcenkompatible Wirtschaftsaktivitäten, wasserresiliente Infrastrukturen und Frühwarnsysteme zu fördern.

Dazu sollte erstens auf internationaler Ebene die Harmonisierung von Kriterien der nichtfinanziellen Berichterstattung zur Umsetzung von SDG 6 vorangetrieben werden. Aufbauend auf den Erfahrungen deutscher Finanzinstitute bei der Ausgestaltung „blauer“ Finanzinstrumente, wie der NRW.Bank mit der Ausgabe von grünen Anleihen zur Finanzierung der Renaturierung der Emscher, und den ersten Praxiserfahrungen mit der EU-Taxonomie-Berichterstattung kann Deutschland dabei international eine Vorreiterrolle einnehmen (NRW.Bank, 2024). Dazu gehört auch, die Bemühungen der International Platform on Sustainable Finance (IPSF) zur Harmonisierung internationaler Nachhaltigkeitstaxonomien zu unterstützen und sich im Rahmen eigener Veranstaltungen dafür einzusetzen.

Zweitens sollten die Voraussetzungen zur Anwendung der EU-Rahmenwerke zur Nachhaltigkeitsberichterstattung in Deutschland verbessert werden: Bestehende öffentliche Unterstützungsangebote, Wissensplattformen und Anlaufstellen, wie z. B. der Deutsche Nachhaltigkeitskodex (DNK), sollten gestärkt und erweitert werden, um mehr Transparenz hinsichtlich wasserbezogener Risiken und Chancen zu schaffen und zwischen Unternehmen und privaten Geldgebern zu vermitteln. In einer Frühphase der erstmaligen oder freiwilligen Berichterstattung durch KMU kann zudem eine Förderung von administrativen Kosten der Vorbereitung, Berichterstattung und Vermarktung von taxonomiekompatiblen Wasserprojekten sinnvoll sein (im Sinne eines „Taxonomie-Turbos“, ähnlich zur Förderung z. B. in Singapur). Erfahrungen zu Unterstützungsangeboten und kapazitätsstärkenden Maßnahmen sollten mit anderen EU-Ländern ausgetauscht werden (Kap. 8.3.1.2).

Drittens sollte die Bundesregierung sicherstellen, dass bessere Daten (z. T. in Echtzeit) und langfristige

Projektionen zum lokalen Wasseraufkommen und Wassernutzungen sowie Wissen zu interregionalen und intersektoralen Kopplungen erhoben, bereitgestellt und ggf. Kompetenzen zu deren Nutzung vermittelt werden, und auch andere Länder dabei unterstützen – je nach lokalen Voraussetzungen und dem Bedarf der Akteure. In diesem Kontext sollten auch Bestrebungen auf EU-Ebene zur Einrichtung eines digitalen und kostenfreien europäischen Zugangsportals (ESAP) unterstützt und entsprechende Anforderungen formuliert werden, um Transparenz hinsichtlich der Nachhaltigkeit wirtschaftlicher Aktivitäten in Bezug auf Wasser- und Meeresressourcen herzustellen. Die Zusammenführung der erforderlichen Offenlegungsinformationen in nationalen Sammelstellen sollte dabei auf Basis bestehender Informationsquellen erfolgen und doppelte Datenerhebungsprozesse vermieden werden (File-Once-Prinzip). Neben Offenlegungsinformationen zur Abschätzung wasserbezogener finanzieller Risiken im Rahmen der europäischen Nachhaltigkeitsberichtsstandards (ESRS) könnten auch weitere nachhaltigkeitsrelevante Rahmenwerke abgeglichen und weitere Datenpunkte im Rahmen des ESAP bereitgestellt werden. Beispiele sind das europäische Emissionshandelssystem für Treibhausgase und die Industrieemissionsrichtlinie zu Schadstofffreisetzen. Dies würde den Wert und die Nutzbarkeit für Finanzmarktakteure, aber auch Privatpersonen und gesellschaftliche Interessensgruppen erhöhen. Auf nationaler Ebene sollten die verbesserten Informationen zu wasserbezogenen Risiken und die Risikobewertungen durch Unternehmen und Kommunen genutzt werden, um systemische Risiken im Rahmen von Stresstests besser erkennen zu können.

8.5.3.2

Stabilisierung der Einnahmen von öffentlichen und privaten Investoren

Umfassende und sozial ausgewogene Bepreisung von Wasser stärken

Wasserpreise und -gebühren sollten zumindest kostendeckend ausgestaltet sein. Kostendeckung sollte dabei auch, wie in der EU-Wasserrahmenrichtlinie gefordert, umwelt- und ressourcenbezogene Kosten einbeziehen. Die Bundesregierung sollte Niedrigeinkommensländer z. B. durch Kapazitätsaufbau bei der Planung und Umsetzung von Preisreformen unterstützen. Die resultierenden Einnahmen eröffnen den Ländern Finanzierungsspielräume, um in Wasserinfrastruktur und naturbasierte Lösungen zu investieren. Die Gestaltung der Preise sollte ebenso wie die Verwendung der Einnahmen sozial ausgewogen sein. Einkommensschwache Haushalte sollten entlastet werden – durch niedrige Preise für Verbrauchsmengen entsprechend der Grundbedürfnisse, niedrige Grundgebühren für den Wasseranschluss oder auch nutzungsunabhängige

Zuwendungen, die die Anreize für einen effizienten Umgang mit Wasser bei der Zahlung von Wasser- und Abwassergebühren erhalten. Ausnahmen bei Entnahmengeltungen für wasserintensive Wirtschaftszweige wie die Landwirtschaft sollten abgebaut werden. Für eine Reform von Wasserpreisen kann zunächst eine bessere Erfassung von Wasserverbräuchen und -entnahmen notwendig sein.

Wasserbezogene Förderungen und Subventionsreformen, insbesondere GAP 2028+

Aktivitäten und Maßnahmen vor allem (aber nicht nur) in der Landwirtschaft, die positive wasserbezogene Auswirkungen für die Allgemeinheit haben – etwa indem sie den Wasserhaushalt insgesamt stabilisieren – können durch die öffentliche Hand kofinanziert werden (z. B. mit Blended-Finance-Instrumenten), bei Steuern und Abgaben begünstigt oder direkt subventioniert werden. Subventionen, die dem Gewässer- und Grundwasserschutz und nachhaltigen Wassermanagement zuwiderlaufen, insbesondere im Agrarbereich, sollten abgebaut werden. In Europa ist die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) das wichtigste Beispiel. Sie sollte ab 2028 so reformiert werden, dass sie den Erhalt von Wasserressourcen und naturbasierte Maßnahmen mit Mehrgewinnen stärker fördert und keine Fehlanreize setzt. Konkret sollte Deutschland darauf hinwirken, dass ab 2028 die in der ersten Säule der GAP vorgesehenen Öko-Regelungen weiter ausgebaut und mit zusätzlichen finanziellen Mitteln versehen werden. Hierfür könnten Mittel aus den flächengebundenen Direktzahlungen abgezogen werden (WBGU, 2024). In Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen, deren Governancesysteme bezüglich Rechenschaftspflicht, Transparenz und sachorientierter Bewirtschaftung die notwendigen Voraussetzungen mitbringen, können wasserbezogene Debt Swaps Mittel freisetzen zur Förderung eines klimaresilienten Wassermanagements.

Vermeidung von indirekten gewässerschädlichen Subventionen

Um die öffentliche Haushaltsplanung gegenüber möglichen gewässerbezogenen Risiken abzusichern und gewässerschädliche Quersubventionen zu vermeiden, sollten öffentliche Förderungen in wasserintensiven Sektoren wie der Industrie, Energie und Landwirtschaft sowie im Bereich der internationalen Klimafinanzierung auf ihre Kompatibilität mit gewässerbezogenen Mindeststandards abgestimmt werden, z. B. Agrarsubventionen, Klimaschutzverträge und NDCs. Als Basis eines möglichen Screenings von Investitionen, die staatlich unterstützt werden, könnten die Do-No-Significant-Harm-Prinzipien der EU-Taxonomie dienen, die technische Mindestkriterien in Bezug auf den Schutz und Erhalt von Wasser- und Meeresressourcen zugrunde legen. Wo dadurch Zielkonflikte zwischen ökologischen, gesellschaftlichen

und wirtschaftlichen Interessen in öffentlichen Haushalts- und Subventionsplanungen identifiziert werden, können z. B. durch die Berücksichtigung von umwelt- und wasserbezogenen Mindeststandards (Green Budgeting) öffentliche Ausgaben zulasten der Gewässerqualität vermieden werden.

Einnahmen generieren durch erweiterte Herstellerverantwortung

Inverkehrbringer von gewässerbelastenden Stoffen oder Produkten sollten im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung stärker an den Kosten für Maßnahmen zur Beseitigung von Gewässerverschmutzung bzw. zum Gewässerschutz beteiligt werden. Eine solche Beteiligung könnte zum Beispiel über Abgaben auf wassergefährdende Produkte und Stoffe erreicht werden. In Deutschland und auf EU-Ebene gibt es bereits Ansätze für eine erweiterte Herstellerverantwortung, welche auf zusätzliche Stoff- und Produktgruppen, z. B. Haushaltschemikalien, sowie Stoffeigenschaften erweitert werden sollten (neben einer Staffelung nach Toxizität auch nach Persistenz in der aquatischen Umwelt; Kap. 7.5.1). Auch global gesehen sollte eine erweiterte Herstellerverantwortung stärker zur Finanzierung von Maßnahmen herangezogen werden. In Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen könnte sie erheblich zur Finanzierung von Infrastruktur beitragen. Die Bundesregierung sollte im Rahmen ihrer bi- und multilateralen Partnerschaften die institutionellen Kapazitäten hierfür schaffen.

EU-weite Pestizidabgabe

Deutschland sollte sich für eine EU-weite Pestizidabgabe einsetzen, z. B. in Form einer Steuer. Diese sollte sowohl Umwelt- als auch Gesundheitsrisiken einbeziehen und Stoffe mit höheren Risiken stärker belasten (Kap. 7.5.2). Die generierten Einnahmen könnten zum einen zur Finanzierung von Maßnahmen des Gewässerschutzes (vorsorgende Maßnahmen und Beseitigung bzw. Kompensation der Effekte verbliebener Pestizide) verwendet werden, und zum anderen, um außergewöhnliche Belastungen aus der Abgabe, z. B. für Landwirt:innen, abzumildern. Auch könnten sie Schulungsmaßnahmen und Beratung für Landwirt:innen zur Anwendung alternativer Pflanzenschutztechniken finanzieren. Ein Vorschlag zur Einführung einer Pestizidsteuer auf EU-Ebene lag bereits vor (Europäisches Parlament und Committee on the Environment, 2023).

Einnahmengenerierung und -verwendung auf lokaler Ebene stärken

Die Umsetzung vieler Maßnahmen für ein klimaresilientes Wassermanagement liegt bei den Kommunen und Städten. Ihre Kompetenzen zur Erhebung und Verwendung von Einnahmen sind jedoch in vielen Ländern begrenzt

(Kap. 8.3.2.3). Deutschland sollte die Möglichkeiten der Einnahmengenerierung auf lokaler Ebene stärken. Auch auf EU-Ebene und über die EU hinaus kann dieser Schritt helfen, lokale Maßnahmen im Wassersektor zu finanzieren, wenn gleichzeitig Rechenschaftspflicht, Transparenz und Standards guter Governance bei der Steuererhebung beachtet werden. In Deutschland sollte z. B. eine Reform der Grund- oder Gewerbesteuer geprüft werden (Kap. 8.3.2.2), welche Kommunen ermöglicht, diese gezielt zur Finanzierung lokaler öffentlicher Güter mit Wasserbezug einzusetzen, z. B. von naturbasierten Maßnahmen zur Flutvorsorge (Kap. 8.6.3). Dabei sollte auch die politische Anreizstruktur für die stärkere Nutzung von Steuern zur Einnahmengenerierung auf lokaler Ebene untersucht und ggf. reformiert werden. So können schlecht ausgestaltete fiskalische Transfers von der nationalen Ebene bewirken, dass Möglichkeiten zur Einnahmengenerierung auf lokaler Ebene nicht genutzt werden (von Haldenwang, 2017). Dagegen sollten Einnahmen aus zentral erhobenen Abgaben, z. B. auf Pestizide oder Abgaben im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung, die mit auf lokaler Ebene zu erfüllenden Aufgaben (z. B. Wasseraufbereitung) verbunden sind, anteilig Städten und Kommunen für die Erfüllung dieser Aufgaben zufließen. Zu erwägen wären auch wasserbezogene Ausgleichszahlungen zwischen verschiedenen Gebietskörperschaften. Diese könnten der ökonomischen Effizienz dienen, wenn von lokalen Maßnahmen auch andere Kommunen, Städte oder Bundesländer profitieren, weil z. B. Renaturierungsmaßnahmen an einem Flussoberlauf sich positiv auf Hochwasserschutz im Flussunterlauf auswirken. Aber auch Gerechtigkeitsüberlegungen könnten solche Kompensationszahlungen begründen, festgelegt auf Basis von zuvor bestimmten Finanzbedarfen zur Sicherung einer klimaresilienten Wasserversorgung und der Finanzkraft von Ländern und Kommunen.

Um die Herausforderungen bei der Erhebung und Verwendung von Einnahmen in Mittel- und Niedrigeinkommensländern zu adressieren, sind neben der Stärkung von Kapazitäten für eine transparente Steuererhebung institutionelle und strukturelle Reformen notwendig. Dabei sollten sowohl die Steuerbasis erweitert und die Effizienz der Einnahmenverwendung verbessert werden, beispielsweise durch Bekämpfung von Korruption oder den Abbau ineffizienter Ausnahmetatbestände, als auch gegen Steuervermeidung vorgegangen werden (World Bank, 2023a: 123 ff.; Redonda et al., 2021; von Haldenwang et al., 2024). Gegenüber den Steuerzahlenden sollte Rechenschaft über die Verwendung der Mittel abgelegt und Rechtssicherheit geschaffen werden.

8.5.3.4

Intermediäre und lokale Kooperationsplattformen stärken

Intermediäre Institutionen stärken, die Wasserakteure, Landnutzer:innen und Finanzakteure zusammenbringen

In der Vermittlung zwischen lokal angepassten, kleineren Ansätzen und Projekten einerseits und den Anforderungen finanzstarker Investoren andererseits können intermediäre Institutionen eine Schlüsselrolle einnehmen: Sie können sowohl öffentliche und private Investoren als auch verschiedene Projekte „poolen“ und verfügen über das nötige Wissen über den Finanz- und Wassersektor sowie im Umwelt- und Klimabereich, um strukturierte Finanzierungen zu vermitteln (passend zu Risikobereitschaft, Laufzeiten, Erwartungen an Erträge bzw. öffentlichen Nutzen usw.; bei langfristig wirksamen Maßnahmen ist beispielsweise oft eine Vor- bzw. Überbrückungsfinanzierung nötig). Entsprechend spezialisierte Banken, revolvingierende Wasserfonds, NGOs oder Forschungseinrichtungen sollten aufgebaut bzw. gefördert werden.

Lokale Governance- und Finanzierungsplattformen zwischen Wasser-, Landnutzungs-, Umwelt- und Finanzierungsakteuren schaffen

Mit Hilfe der Intermediäre sollten die EU, nationale und subnationale Regierungen lokale Austausch- und Kooperationsformate (z. B. Städte und ihre jeweiligen Einzugsgebiete) „flächendeckend“ institutionalisieren, beispielsweise zwischen Wasserversorgern, Wassernutzern, Landnutzern, Umwelt- und anderen NGOs sowie öffentlichen, gemeinwohlorientierten und kommerziellen Geldgebern. Dort können eine gemeinsame Wissensbasis und Transparenz hergestellt, Strategien und Maßnahmen abgestimmt sowie Finanzierungen organisiert werden. Hierbei sollten auch Akteure der Klimaanpassung und des Biodiversitätsschutzes eingebunden werden, da erstens z. T. Synergien mit Projekten für resiliente Wasserversorgung bestehen, und zweitens öffentliche Wasserversorger, die vielerorts hohes Gewicht und Ansehen haben, wertvolle Partner für eine Transformation des Umgangs mit Land sein können.

Kompetenzen und Monitoringkapazitäten für die Umsetzung ergebnisorientierter blended-finance-Ansätze aufbauen

Für den Erfolg ergebnisorientierter Finanzierungsansätzen z. B. für naturbasierte Lösungen oder andere Vorhaben mit ökologischen und sozialen Mehrgewinnen ist entscheidend, dass die Projekte und Vergütungsmodelle sorgfältig definiert und geplant und die Erfolgskriterien überprüft werden können. Entsprechende Expertise und Beratungskapazitäten sollte z. B. in öffentlichen

Institutionen bzw. Ämtern in Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen aufgebaut werden. Best-Practice-Beispiele sollten gesammelt und in Zusammenarbeit mit Finanzakteuren zu übertragbaren und skalierbaren Finanzierungsmodellen entwickelt werden.

8.5.4

Proaktive Rolle der Wissenschaft: Politik und Stakeholder zusammenbringen

Die proaktive und international kooperierende Rolle der Wissenschaft ist aus Sicht des WBGU essenziell, um zukünftig besser mit regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension umzugehen. Die Errichtung einer Water Mapping Initiative soll die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik stärken.

Water Mapping Initiative etablieren

Der WBGU empfiehlt die Einrichtung einer Water Mapping Initiative zur Identifikation und Vermeidung von lokalen und regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension. Sie besteht aus zwei Einheiten: einer Wissenschaftsplattform und einem Expert:innengremium. Die Wissenschaftsplattform soll bestehende wissenschaftliche Expertise zusammenführen und regionalspezifische Veränderungen ermitteln, um drohende regionale Wassernotlagen zu identifizieren.

Zur Steuerung der Plattform und zur Einspeisung ihrer Arbeitsergebnisse in politische Prozesse empfiehlt der WBGU zudem die Einrichtung eines Expert:innengremiums. Das Expert:innengremium soll mit den Arbeitsergebnissen der Plattform die Grundlagen für den Austausch zwischen Wissenschaft, Politik und weiteren Stakeholdern schaffen und Vorhersagen für die von Wassernotlagen bedrohten Regionen entwickeln. Des Weiteren informiert es die UN-Wasserkonferenzen, waserbezogene Dialogplattformen der Weltregionen und kooperiert mit Wasserbehörden bei der Umsetzung von klimaresilientem Wassermanagement.

Die Plattform und das Expert:innengremium sollten institutionell bei UN Water angesiedelt sein. Das Hosting der Datenbanken und die wissenschaftliche Auswertung sollten bei international beauftragten nationalen Forschungseinrichtungen erfolgen. Die Finanzierung erfolgt idealerweise durch die G7 und die G20 sowie auf freiwilliger Basis von weiteren Staaten.

Inter- und transdisziplinäre Wissenschaft für klimaresilientes Wassermanagement fördern

Klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement bedarf der stetigen Weiterentwicklung, Erneuerung und Instandhaltung von Infrastrukturen sowie personellen und institutionellen Kapazitäten, um dem

steigenden Wasserbedarf bei zunehmender Variabilität des Wasserdargebots gerecht werden zu können. Diese notwendige innovative Leistung können die Managementsysteme alleine nicht vollbringen. Stattdessen sind inter- und transdisziplinäre Forschung, Nachwuchsförderung und Politikberatung, die zu den Kernaufgaben von Wissenschaft gehören, von zentraler Bedeutung. Der WBGU unterstreicht die Notwendigkeit, klimaresilientes Wassermanagement als orientierendes Leitbild für die Wissenschaftspolitik in Deutschland zu begreifen. Inter- und transdisziplinäre Forschungsansätze in Bezug auf Wasserkreislauf und Wassermanagement, die sowohl Grundlagen- als auch angewandte Forschung verfolgen, sollten gefördert werden. Dies umfasst somit ingenieurs- und naturwissenschaftliche Forschung, wie auch rechts-, sozial-, kultur- und volkswirtschaftliche Disziplinen, vereint durch das erkenntnisleitende Interesse, Wasser für alle Menschen weltweit, in ausreichender Quantität und Qualität auch in Zukunft bereitzustellen.

Unterschiedlichen Akteuren aus Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Industrie, usw. sollten auf Plattformen und in Arbeitskreisen ein gleichberechtigter, inklusiver und multidirektionaler Wissensaustausch über den Umgang mit wasserbezogenen Herausforderungen ermöglicht werden. Er soll das zum Teil neue Wissen über Nichtstationarität und Verschärfungen ebenso beinhalten wie lokales Wissen und Erfahrungswissen, etwa von Land- und Forstwirten. Weiterhin erachtet der WBGU Citizen Science und Citizen Labs als wichtige Instrumente transdisziplinärer Forschung und plädiert für deren weiteren Ausbau.

Internationale Wissenschaftskooperation fördern

Zwischenstaatliche, internationale Kooperation ist eine grundlegende Voraussetzung im Umgang mit den im Gutachten beschriebenen Verschärfungen im Wasserbereich. Sie ist notwendig, um die systemischen Veränderungen bei Wasserverfügbarkeit, -bereitstellung und -management zu erkennen sowie technologische, soziale und institutionelle Innovationen für klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement zu entwickeln. Innovationen müssen an die unterschiedlichen gesellschaftlichen und ökologischen Kontexte ihres Einsatzes angepasst sein, um erfolgreich wirken zu können und das klimaresiliente Wassermanagement voranzutreiben. Internationale Wissenschaftskooperation zu Wasser ist weiterhin ein Instrument des Austauschs über gesellschaftliche und politische Normen, inklusive Demokratieförderung durch Integriertes Wasserressourcenmanagement, und für die Weiterentwicklung wissenschaftlicher Standards.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt der WBGU bi-, tri- und multilaterale Wissenschaftsförderung im Bereich Wasser auszubauen. Dies umfasst zum einen gemeinsame

Förderlinien im Bereich wasserbezogener Wissenschaft, gestaltet und finanziert von Wissenschaftsförderern aus unterschiedlichen Ländern und Regionalorganisationen, zum anderen die Förderung multilateraler Förderformate, z. B. über das Belmont Forum, Future Earth sowie die empfohlene Water Mapping Initiative. Des Weiteren sollte sich die Bundesregierung auf Ebene der Vereinten Nationen sowie Club-Governance-Formaten, besonders G20 und G7, für wissenschaftspolitische Themen und die Finanzierung von Wissenschaftssystemen durch Nationalregierungen weltweit, aber insbesondere auch in Mitteleinkommensländern und Regionalmächten einsetzen (Hornidge et al., 2023; Taylor et al., 2022). Wissenschaftspolitik wird im multilateralen Kontext weiterhin viel zu oft als „lediglich westliche/nördliche Angelegenheit“ abgetan. Dies ermöglicht es gerade großen Regionalmächten und Mitteleinkommensländern mit großen, jungen Bevölkerungen wie Indonesien, Nigeria, Indien, Brasilien, Südafrika weiterhin, am Anteil ihres Bruttosozialprodukts gemessen, vergleichsweise geringe Summen in die Wissenschaft sowie die Bildung und Ausbildung ihrer Bevölkerung zu investieren.

Im gemeinsamen Umgang mit den in Kapitel 3 dargestellten Verschärfungen auf multilateraler Ebene bedeutet dies jedoch, dass Verhandlungen aus sehr unterschiedlich strukturierten und leistungsfähigen Wissenschaftssystemen herausgeführt werden. Gemeinsame, wissenschaftsbasierte Lösungsansätze werden nur bedingt gefunden und sind noch seltener mehrheitsfähig. Dies sollte gezielt adressiert werden, indem Lösungsansätze für klimaresilientes Wassermanagement gemeinsam wissenschaftlich entwickelt werden und die wissenschaftlichen Kapazitäten gerade in den großen Regionalmächten Asiens, Afrikas, Lateinamerikas auch über eigene nationale Politikgestaltung, unterstützt durch wissenschaftspolitische Zielsetzungen auf G20 Ebene, auf- und ausgebaut werden.

Globales Informationssystem einrichten

Zudem empfiehlt der WBGU die Schaffung eines globalen Informationssystems für Wasser, Klima und Land und ökologische Nachhaltigkeit. Dafür sollte die Standardisierung und Integration von Datenbanken vorangetrieben werden. Außerdem bedarf es gemeinsamer Analysehubs, z. B. durch den Ausbau von Wissenschaftspolitik. Dieses globale Informationssystem ist Grundlage für die Verbesserung der Frühwarnsysteme für extreme Wetterereignisse. Frühwarnsysteme sind zentral, decken in herkömmlicher Denkweise und Anwendung allerdings meistens die „letzte Meile“ nicht ab. Hierauf muss ein Fokus gelegt werden. Auch hier gilt es, stärker auf die planetaren Wassernotlagen und Zustände jenseits der Grenzen der Beherrschbarkeit abzustellen. Zudem soll dies dazu dienen, die Modellierungskapazitäten in Bezug auf Dürre und Hochwasserereignisse zu verbessern,

wovon insbesondere Länder mit mittleren und niedrigen Einkommen profitieren können.

Die Verbesserung der Datenlage unterstützt auch die bessere Umsetzung des Konzepts Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus (WEFE Nexus). Wie in Kapitel 2 erläutert, verfolgt dieses Konzept das Ziel, Politikkohärenz zu verbessern und die Interdependenzen zwischen den Zielen für nachhaltige Entwicklung besser zu verstehen und managen (Srigiri und Dombrowsky, 2021, 2022). Umsetzungsdefizite ergeben sich unter anderem aufgrund der unzureichenden Datenlage, die eine Messung der Wechselbeziehungen und Zielkonflikte verhindert. In diesem Zusammenhang sollten im Rahmen der Internationalen Wasserstrategie auch die erforderlichen Transformationen der Ernährungs- und Energiesysteme behandelt werden.

Rechtliche Voraussetzungen zur direkten Mittelverwaltung in Partnerländern schaffen

Bislang sieht der rechtliche Rahmen in internationalen Forschungsk Kooperationen vor, dass sämtliche Personal-, Sach- und Reisemittel in den Forschungseinrichtungen der Geberländer verwaltet werden. Als Mittel zur Stärkung der Forschungskapazitäten empfiehlt der WBGU, die rechtlichen Voraussetzungen zur direkten Mittelverwaltung inklusive Abrechnung und Prüfung in Partnerländern zu schaffen. Dies stärkt die Rolle der dort forschenden Wissenschaftler:innen und schafft Kapazitäten in der Mittelverwaltung. Der WBGU schließt sich hier einer Empfehlung der Deutschen UNESCO-Kommission an, die rechtlichen Voraussetzungen in der deutschen Wissenschaftsförderlandschaft zu schaffen, um Weiterleitungen an Partnerinstitutionen außerhalb Europas vornehmen zu können, ohne dass sowohl Haftungsrisiko als auch Prüftätigkeit vollständig auf die deutschen Wissenschaftseinrichtungen übertragen werden. Dies ist insbesondere für außeruniversitäre Forschungseinrichtungen ohne privatwirtschaftliche Einnahmen und mit geringen Personalausstattungen in den Servicebereichen nicht leistbar. Diese wiederum, z. B. Leibniz-Institute oder auch ressortnahe außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, sind häufig die Art von interdisziplinär und international arbeitenden Wissenschaftseinrichtungen, die diese Formen von Wissenschaftskooperationen mit Partnerinstitutionen in Afrika, Asien oder Lateinamerika durchführen. Der WBGU empfiehlt in diesem Zusammenhang weiterhin, die Ermöglichung geteilter Haftung zwischen Wissenschaftsförderer, deutschem und weiterleitendem Institut und ausländischem Partnerinstitut (DUK, 2024).

8.5.5

Bildung als Grundlage für eine informierte Gesellschaft

Die Möglichkeit, sich über aktuelle und zukünftige Wasserthemen und Zusammenhänge bilden zu können, ist die Basis für einen gesamtgesellschaftlichen, wohlinformierten Diskurs zum Umgang mit Wasser und Wassernotlagen. Das gesellschaftliche Interesse für Wasserfragen kann durch Bezüge zur eigenen Lebenswelt und den Umgang mit lokalen Wasserproblemen gestärkt werden.

Bildungs-, Beratungs- und Schulungsprogramme gezielt fördern

Der WBGU empfiehlt, gezielte Bildungsprogramme national und länderübergreifend zu initiieren sowie eine internationale Diskussion über neue Formen des Wirtschaftens und der Wertschätzung der Ökosystemleistungen in Gang zu setzen. Hierbei sollte Wissen global gleichberechtigt und unter Einbezug aller relevanten Akteure ausgetauscht werden. Förder- und Bildungsprogramme sollten gemeinsam national und international koordiniert werden und einem roten Faden folgen, so dass Menschen mit unterschiedlicher Profession und unterschiedlicher Herkunft gleichermaßen informiert und angesprochen werden und teilhaben können.

Gezielte Beratungs- und Schulungsprogramme sollten – auch auf Basis der Ergebnisse des Wissensaustauschs – auf lokaler Ebene durchgeführt und auf die Begebenheiten vor Ort zugeschnitten werden, um so das Bewusstsein für lokale Wasserprobleme zu schärfen und Lösungen bereitzustellen. So werden lokale Akteure befähigt, den Verschärfungen im Wasserbereich zu begegnen. Hierzu sollten auch digitale Technologien genutzt werden, z. B. gemeinsame Portale zum Wissensaustausch oder Apps, die tagesaktuelle Informationen wie Wasserverbräuche, Nitratbelastungen oder Grundwasserpegel bereitstellen können.

Thema Wasser in schulischen Lehrplänen stärken

Die Aufnahme des Themas Wasser in Lehrpläne ermöglicht Kindern und Jugendlichen durch lebensnahe Lerneinheiten, unter anderem mehr zu Wasserkreisläufen, der Wasserversorgung, der Bedeutung von Wasser für Mensch und Natur sowie den Folgen des Klimawandels zu erfahren. Es gibt bereits eine große Zahl an Lehrmaterialien für alle Altersstufen und Schularten. Der WBGU empfiehlt auf Grund der überragenden Bedeutung des Themas Wasser, dass Lehrpläne über das gesamte Schulspektrum hinweg sich des Themas fächerübergreifend verpflichtend annehmen.

8.6

Forschungsempfehlungen

Es gibt bereits eine Vielzahl zukunftsweisender Forschungsvorhaben im Bereich Wasser, welche die Komplexität von Wassergovernance konzeptionell und empirisch adressieren, z. B. die Fördermaßnahmen „Wasser: N“ und „Globale Ressource Wasser“ (GRoW; BMBF, 2024c; 2021a). Um eine Internationale Wasserstrategie zu entwickeln und möglichst partizipativ und effektiv gestalten zu können, bedarf es weiterer Forschung, die sowohl blaues als auch grünes Wasser und mögliche Governanceansätze in den Blick nimmt. Um höhere Investitionen auszulösen, sollten u. a. potenzielle wasserbezogene Schäden besser quantifiziert sowie Finanzierungsansätze für naturbasierte Lösungen weiterentwickelt werden.

8.6.1

Internationale Zusammenhänge verstehen und kommunizieren

Es bedarf sowohl Grundlagenforschung zu den Wirkungszusammenhängen regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension, methodischen Innovationen als auch Forschung zu Politikintegration und dem Umgang mit Schnittstellen zwischen mehreren Politikbereichen.

Ausmaß und Dynamiken regionaler Wassernotlagen mit planetarer Dimension erfassen und Handlungsoptionen entwickeln

Die Dynamik des globalen Klimawandels und seine Auswirkungen auf Wasserdargebot und -verteilung wird die Weltgemeinschaft mittel- und langfristig mit Herausforderungen jenseits des Erfahrungsspektrums menschlicher Gesellschaften konfrontieren. Dabei wird sich teilweise auch die Frage nach den Grenzen der Beherrschbarkeit stellen. Jüngere Forschungsarbeiten haben bereits erste planetare Wassernotlagen identifiziert. Zum potenziellen Ausmaß, der regionalen Verteilung und der Bandbreite ihrer spezifischen Ausprägungen steht die Forschung noch am Anfang. Auch zum Umgang mit Unsicherheit und der Verankerung langfristig potenziell kritischer Entwicklungen in heutigen Entscheidungen (Politik, Planung, Vorbeugung) besteht Forschungsbedarf. Der WBGU empfiehlt daher die Förderung solcher Fragestellungen in nationalen und internationalen Forschungsagenden.

Erforschung der grenzüberschreitenden Dimension von grünem Wasser

Die komplexen internationalen Wirkungszusammenhänge von grünem und atmosphärischem Wasser, z. B. durch Landnutzungsänderungen, die Effekte auf

Verdunstungsströme und Niederschläge anderer Länder haben, müssen dringend erforscht werden. Dies bedarf zum einen Grundlagenforschung zu den grenzüberschreitenden Wirkungsweisen von grünem Wasser durch Modellierung und Szenarien (Hydrologie, Physik, Klimaforschung) und zum anderen rechts-, politikwissenschaftlicher und ökonomischer Forschung zu Grundlagen und Optionen der Zusammenarbeit sowie angewandte Forschung zu Regulierungsmöglichkeiten und der Effektivität von Politikinstrumenten.

Wasser- und Klimaszenarien auf mittlerer Ebene

Für globale und regionale klimaresiliente Wassergovernance werden insbesondere Wasser- und Klimaszenarien auf mittlerer Ebene (Meso- statt Mikro-Ebene) gebraucht, um z. B. Veränderungen auf Ebene von Weltregionen wie Europa, Nordafrika oder Südostasien erkennen zu können. Da sich ein Großteil der bisherigen Wasserforschung auf Flusseinzugsgebiete fokussiert, besteht hier verstärkter Bedarf, Modellierungsmethoden und Forschungsansätze weiterzuentwickeln.

Sozio-hydrologische und sozialwissenschaftliche Forschung

Der Umgang mit der globalen Wasserkrise erfordert es, die Systemzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Natur und Mensch besser zu verstehen. Sozio-hydrologische Forschung ist hierbei von hoher Relevanz, da sie ermöglicht, das komplexe Zusammenspiel naturwissenschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren in aquatischen Systemen zu untersuchen. Sozio-Hydrologie ist die Kombination aus hydrologischer und soziologischer Forschung, primär durch quantitative Ansätze und Modelle. Darüber hinaus empfiehlt der WBGU die Förderung der sozialwissenschaftlichen Wasserforschung, die ökonomische, politische, soziale und rechtliche Aspekte untersucht, insbesondere mit Hinblick auf Optionen der Anpassung in unterschiedlichen regionalen Kontexten.

Erforschung effektiver Schnittstellen

Notwendig ist politik- und rechtswissenschaftliche Forschung zu der Frage, ob und wie effektive Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Politikbereichen aussehen bzw. institutionell aufgebaut werden können. Es bedarf sowohl der Forschung zum Design von Schnittstellen von Verhandlungen der Abkommen (Vertragsstaatenkonferenzen) als auch zu den dazugehörigen Science-Policy-Schnittstellen (z. B. im Bereich Klima, Biodiversität, Plastik, Verschmutzung). Herausforderungen bisheriger Schnittstellengovernance und mögliche institutionelle Innovationen sollten hierbei diskutiert werden.

8.6.2

Bi- und multilaterale Wissenschaftsförderung ausbauen

Neue regionale Forschungsallianzen gründen und fördern, um Lernprozesse auf regionaler und globaler Ebene anzustoßen

Neue regionale Forschungsallianzen könnten die regionalen Plattformen informieren. Hierfür werden Szenarien auf mittlerer Ebene (Meso- statt Mikroebene) sehr relevant sein, die Veränderungen im Wasserkreislauf in Weltregionen, wie z. B. Europa, Nordafrika oder dem mittleren Osten aufzeigen.

Regionale und multilaterale Förderer sollten Förderlinien aufsetzen, auf die sich Wissenschaftler:innen unabhängig von ihrer geographischen Ansiedlung bewerben können und mit besonderer Förderung für Süd-Süd- und Süd-Nord-Wissenschaftskooperationen, wie z. B. Future Earth oder das Belmont Forum. Zum jetzigen Zeitpunkt stellt die EU als regionale Wissenschaftsförderorganisation eine weltweite Ausnahme dar. Laut International Science Council werden bisher über 80 % der Forschung weltweit entlang nationaler Logiken der Wissenschaftsförderung aufgesetzt (ISC, 2021: 13). Bi- und multilaterale Wissenschaftsförderung entlang gemeinsam definierter Förderziele und für den Umgang mit den globalen Herausforderungen sollte dringend und substanziell ausgebaut werden. Entwickelte Lösungsansätze und Transformationspfade ziehen regionale und transregionale Spillover-Effekte zu wenig in Betracht. Auch bedarf es der expliziten Förderung transregionaler Wissenschafts- und Innovationsnetzwerke, um gegenseitige Lernprozesse in der Ausgestaltung von Wassergovernance sowie bezüglich der Nachhaltigkeits- und Qualitätsstandards zu ermöglichen und gezielt anzusteuern.

Wissenschaftsförderung sollte durch gemeinsame bi- und trilaterale Förderlinien gestärkt werden, auf allen Kontinenten und mit Ländern aller Einkommensgruppen (Niedrig-, Mittel- und Hoheinkommensländern), wie beispielsweise die Kooperation zwischen dem BMBF und Förderorganisationen von Nationalstaaten. Dies bedeutet Förderlinien beispielsweise gemeinsam zwischen BMBF und Wissenschaftsministerien anderer Länder auszubauen, wie sie z. B. in der Zusammenarbeit mit Südafrika, Polen und Israel oder auch im Rahmen der Wissenschaftsförderung durch die Europäische Union bereits existieren. Gleiches gilt für die jeweiligen Forschungsgemeinschaften, z. B. die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) oder den Academic Council der Vereinten Nationen.

Förderung inter- und transdisziplinärer Projekte zu nachhaltigem Wassermanagement

Die deutsche und europäische Wissenschaftsförderlandschaft sollte gezielt inter- und transdisziplinäre Projekte im Bereich nachhaltigen Wassermanagements in unterschiedlichen Weltregionen und mit verschiedenen Managementherausforderungen fördern. Dies umfasst wissenschaftliche und lokal angepasste Innovationsentwicklung im Bereich der Bewässerungslandwirtschaft genauso wie in der städtischen Ver- und Entsorgung, der Aufbereitung von Abwasser und der Energieerzeugung durch Wasserkraft. Wichtig ist hierbei auf transdisziplinäre Forschungsdesigns zu achten, in denen die transformative Co-Produktion von Wassermanagementwissen in enger Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen gefördert wird. Hierbei sollte besonders darauf geachtet werden, dass neben den Innovationen und neuen Wissensbeständen im Bereich nachhaltigen Wassermanagements auch die institutionellen Strukturen und Kapazitäten ausgebildet werden, um dieses Wissen in den lokalen Systemen in die Umsetzung zu tragen.

Weiterentwicklung der Methoden zur Erfassung und Bewertung wasserbezogener Umweltwirkungen und Spillover

Um die positiven Auswirkungen von Handel auf Wasserverfügbarkeit und -qualität zu stärken und negative Spillover zu vermeiden, braucht es zunächst eine Weiterentwicklung der Methoden zur Erfassung und Bewertung der wasserbezogenen Umweltwirkungen und Spillover, z. B. durch die Weiterentwicklung des Konzepts eines wirkungsbasierten Wasserfußabdrucks. Aufgebaut werden kann dabei z. B. auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts „WELLE“ zur Bestimmung des Wasserfußabdrucks von Unternehmen innerhalb der Fördermaßnahme „Globale Ressource Wasser (GRoW)“ des BMBF (TU Berlin, 2020) und einem durch das Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojekt zur konzeptionellen Weiterentwicklung und Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland (UBA, 2022b). Auch sollte eine Weiterentwicklung der Modelle zur Umweltfolgenabschätzung in bi- oder multilateralen Handelsabkommen geprüft werden. Die EU hat hierzu 2021 ein neues Konzept vorgelegt (IEEP, 2021), das jedoch z. B. keine wirkungsbasierte Erfassung des Wasserfußabdrucks berücksichtigt. Auch werden in vielen Ländern Umweltfolgen nicht umfassend abgeschätzt. Weiterhin ist Forschung zu Governancemechanismen notwendig, die eine effektive Integration dieser Umweltwirkungen in private und staatliche Entscheidungen bewirken.

Internationale Beziehungen durch Wissenschaftskooperation und Forschungsallianzen stärken

Beim Aufsetzen von Förderlinien im Bereich des Wassermanagements und der Wasserforschung sollte gezielt darauf geachtet werden, kooperative Forschungsprojekte mit verschiedenen Ländern zu fördern. Folgende drei Ländergruppen sollten berücksichtigt werden: (1) Länder, die zunehmende Herausforderungen im Wassermanagement haben (z. B. Dürren, Überschwemmungen), wie z. B. Jordanien, Libanon, Mongolei oder Usbekistan; (2) Länder, die von sozialer Polarisierung und politischen Autokratisierungsprozessen betroffen sind sowie (3) Länder, die auf Ebene geopolitischer Aushandlungsprozesse von hoher strategischer Relevanz als Partner und Allianzen für Deutschland und Europa sind.

Die hier empfohlene Wissenschaftskooperation sollte alle wissenschaftlichen Akteure umfassen, einschließlich Universitäten, beratende Institute und Think Tanks. Hier bieten sich umfassende Möglichkeiten mit sehr unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteuren wie NGOs, halbstaatlichen Wassernutzergemeinschaften, Frauenorganisationen usw. im engen Austausch zu stehen. Die gemeinsame sach- und wissensorientierte Kooperationsarbeit ermöglicht sehr engen und vertrauensaufbauenden Austausch. Partizipative und sozial inklusive Ansätze der Kooperation können gelebt werden, hierdurch das Wassermanagement verbessert und gleichzeitig breitere institutionelle Strukturen und Kulturen für inklusive und rechenschaftspflichtige Governance aus- und aufgebaut werden.

Bei Förderlinien im Bereich nachhaltiger Wassergovernance sollte darauf geachtet werden, dass sowohl die formellen als auch informellen, also „de jure“ und „de facto“ praktizierten Seiten des Wassermanagementsystems empirisch erhoben und auf Schwachstellen oder auch Anpassungsfähigkeit im Umgang mit Wassernotlagen analysiert werden. Dies erfordert inter- und transdisziplinäre Projektdesigns und eine entsprechend interdisziplinäre Zusammensetzung der sozialwissenschaftlichen Teile der Projektteams (Rechtswissenschaften, Soziologie und Ethnologie). Darauf aufbauend sollte die Entwicklung institutioneller Innovationen und Lösungsansätze für bottom-up und top-down integrierte Formen des Managements sichergestellt bzw. in die Umsetzung getragen werden.

8.6.3 Forschung für eine nachhaltige Finanzierung

Ein höheres Engagement von Unternehmen, Finanzmarktakteuren und der öffentlichen Hand für die Minderung wasserbezogener Risiken, die Erhaltung von

Wasserressourcen und klimaresiliente Infrastruktur setzt eine solide Informationsbasis zu solchen Risiken sowie zu Mehrgewinnen insbesondere von naturbasierten Maßnahmen voraus. Für letztere sollten Finanzierungsmodelle weiterentwickelt werden. Die Möglichkeiten zur besseren Finanzierung lokaler öffentlicher Güter sowie Wirkungen und Reformbedarfe wasserbezogener Abgaben sollten umfassend analysiert werden.

Projektionen bzw. Daten und Modellierungen zu potenziellen wasserbezogenen Schäden, Anpassungskosten und Mehrgewinnen verbessern

Schätzungen zu möglichen regionalen Schäden durch wasserbezogene Klimarisiken, zu den Kosten von Anpassungsmaßnahmen und ggf. verbleibenden Restrisiken und möglichen Zusatznutzen (z. B. für Gesundheit und Umwelt) sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die empirische Datenbasis sollte verbessert und Projektionen sowie die Modellierung von Unsicherheiten weiterentwickelt werden (Caretta et al., 2022: 652 f.), auch um den richtigen Zeitpunkt für häufig irreversible Anpassungsinvestitionen im Spannungsfeld zwischen rechtzeitiger Vorsorge und einer bei längerem Abwarten verbesserten Informationsbasis zu bestimmen (Ginbo et al., 2021). Neben Infrastrukturmaßnahmen sollten insbesondere auch die Kosten und Nutzen von naturbasierten Lösungen, Effizienzmaßnahmen auf der Verbrauchsseite und veränderten Regulierungen und Wasserpreisen untersucht werden (Caretta et al., 2022: 652 f.; Kap. 6.5.1).

Wirtschaftliche und finanzielle Kosten des Nicht-Handelns: „Stress-Testing“ von Volkswirtschaften mit globalen Verflechtungen

Die Auswirkungen möglicher physischer Schäden infolge von „zu wenig“ bzw. „zu viel“ Wasser auf die Wirtschaft und den Finanzsektor sollten auch auf Ebene ganzer Volkswirtschaften besser untersucht werden. Dabei sollten internationale Auswirkungen nationaler Krisen, z. B. über Handel, Transportwege und Finanzmärkte, einbezogen werden. Die betrachteten Zeitskalen sollten die z. T. jahrzehntelange Lebensdauer vieler Kapitalstöcke und insbesondere von Infrastrukturen berücksichtigen. Die Analyse sollte direkte Auswirkungen durch Kapitalstockschäden, indirekte betriebswirtschaftliche Einschränkungen und sektorübergreifende Effekte umfassen sowie die damit verbundenen Kreditausfallrisiken bei Banken und Auswirkungen auf die Versicherungswirtschaft.

Hybride Finanzierungsinstrumente und neue Geschäftsmodelle für naturbasierte Ansätze entwickeln

Angesichts der hohen Investitionsbedarfe sollte vermehrt private Beteiligung bei der Finanzierung naturbasierter Ansätze zum Einsatz kommen. Dabei kann hybrider

Finanzierung gemeinsam mit staatlichen Akteuren eine wichtige Rolle zukommen. Für die Entwicklung und Umsetzung entsprechender Geschäftsmodelle ist transdisziplinäre Forschung erforderlich, welche Akteure des Finanzsektors und lokale Investoren einbindet. Die Forschung sollte dabei sowohl die Ausgestaltung der Finanzierungsformen und -instrumente als auch ein Monitoring und eine Wirkungsanalyse von sozialen und ökologischen Nutzen umfassen. Ebenso sollte untersucht werden, welche Anreiz- und Lenkungswirkung vor allem auf institutionelle Investoren durch eine Offenlegung von wasserbezogenen Risiken und externen Kosten bestenfalls erreicht werden kann.

Bewertung von Mehrgewinnen weiterentwickeln und in die Umsetzung bringen

Naturbasierte Ansätze führen zu gesellschaftlichen und ökologischen Mehrgewinnen, deren Monetarisierung und Kompensation zu verlässlichen Einnahmenquellen für private Investoren führen kann. Trotz vorhandener Anstrengungen, Ökosystemleistungen zu bewerten, und trotz Diskussionen um deren Honorierung beispielsweise im Waldkontext, finden diese Zusatznutzen bisher keinen systematischen Eingang in staatliche Förderung. Ein Grund für die mangelnde Umsetzung ist nach wie vor die Datenlage. Ökosystemleistungen sind lokal differenziert und vielfältig. Insbesondere hinsichtlich wasserbezogener Mehrgewinne braucht es weitere Forschung von ihrer Erfassung und Bewertung bis hin zu einer effizienten und effektiven Integration in die Politik bzw. staatliche Maßnahmen.

Wirkungsanalyse einer erweiterten Abgabenreform

Länder sollten die Auswirkungen einer möglichen Reform von wasserbezogenen Abgaben im Sinne der in Kapitel 8.3.2 diskutierten Ansätze auf Ökosysteme, private Haushalte sowie wichtige Wirtschaftssektoren wie Landwirtschaft und Industrie untersuchen. Dabei sollten unerwünschte Nebenwirkungen der Maßnahmen wie z. B. nicht beabsichtigte Belastungen von Akteuren außerhalb der Zielgruppe oder Verlagerungseffekte, z. B. Abwanderung von verschmutzungsintensiven Wirtschaftsaktivitäten, berücksichtigt und analysiert werden, wie diese verhindert werden können. Zu diesem Zweck sollte eine Reform bzw. Einführung wasserbezogener Abgaben systemisch im Zusammenhang mit einer Reform weiterer Steuern, Gebühren oder Beiträge gesehen werden: z. B. erstattet Dänemark einen Teil der Einnahmen aus der Pestizidsteuer über die Senkung anderer Steuern an Landwirt:innen zurück.

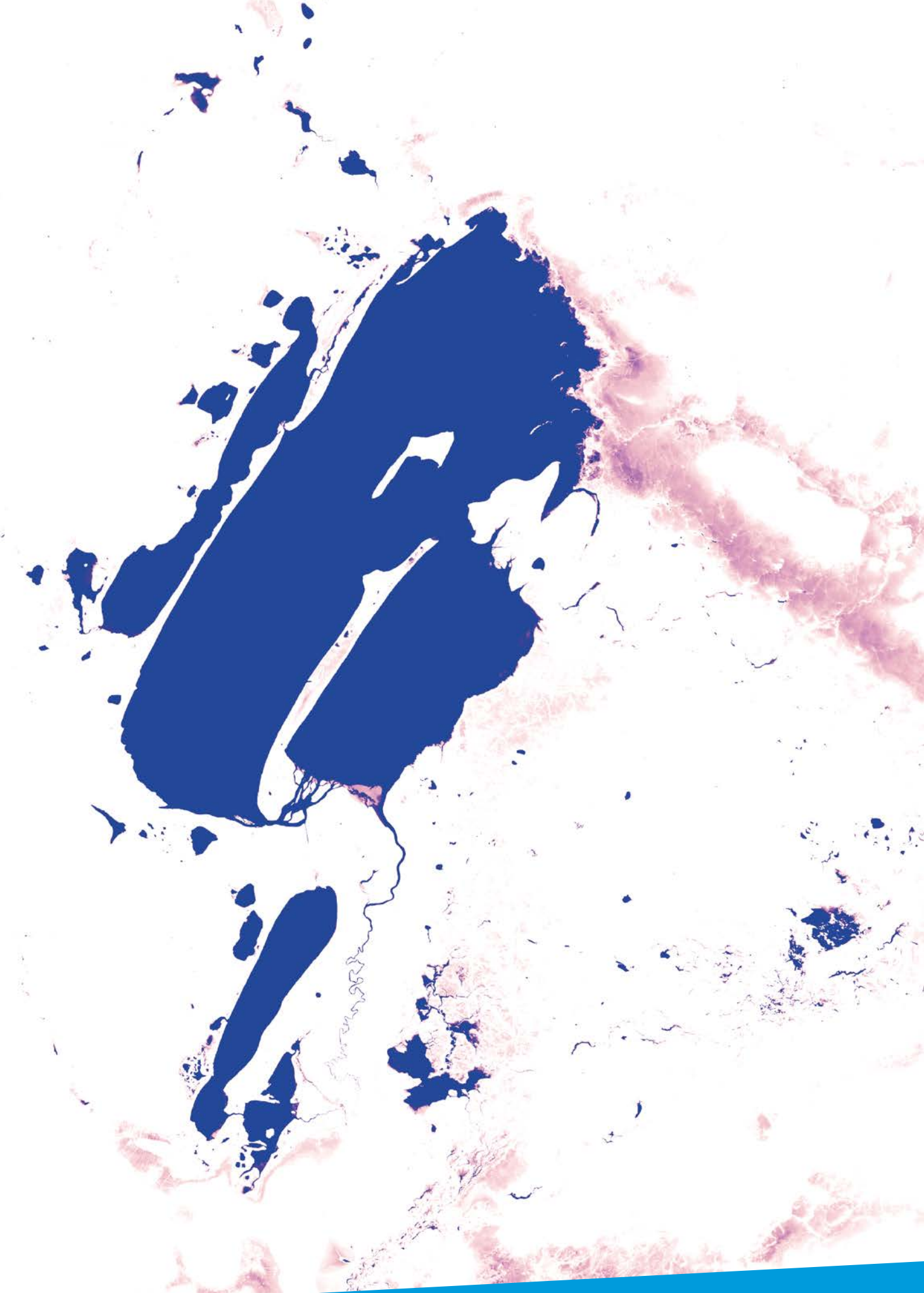
8.6.4

Forschung zu Herausforderungen der politischen Kommunikation

Einhergehend mit den unter Kapitel 3 dargestellten sozialen Polarisierungs- und politischen Autokratisierungsprozessen ist eine generelle Abnahme der Popularität von Themen mit Nachhaltigkeits- und Transformationsbezug zu beobachten. Dies umfasst Themen zum Umgang mit der Klima- und der Biodiversitätskrise genauso wie die Gestaltung des notwendigen Strukturwandels in Produktionssystemen und Konsummustern mit dem Ziel der Klimastabilisierung. Der Green Deal der EU-Kommission und der Global Gateway, welcher ursprünglich als Antwort auf Chinas Belt and Road Initiative gedacht war, werden in Teilen des südlichen Afrika als „Green Colonialism“ wahrgenommen. Die Richtlinien von Ursula von der Leyen für 2024–2029 werden das politische Handeln der Europäischen Kommission in den kommenden Jahren bestimmen. Jedoch gehen diese unzureichend auf die internationale Dimension nachhaltiger Entwicklung ein. Die Agenda 2030 wurde als zu komplex angesehen und eine Post-2030-Agenda in den Richtlinien nicht genannt (von der Leyen, 2024).

Forschung zu politischer Kommunikation fördern

Da klimaresilientes Wassermanagement Mehrheiten benötigt empfiehlt der WBGU, Forschung zu den kommunikativen Herausforderungen im Umgang mit multiplen Verschärfungen zu fördern. Es bedarf der Fähigkeit, auf die derzeit von Fake News geprägte politische Kommunikation zu reagieren und faire, öffentliche, demokratische Diskurse zu ermöglichen. Folgende Forschungsfragen sollten im Vordergrund stehen: Was lässt sich zur effektiveren Kommunikation klimaresilienten Wassermanagements und weiterer Nachhaltigkeitsthemen empirisch nachweisen und kommunizieren, um Betroffene zu erreichen und durch eine faire demokratische Auseinandersetzung Mehrheiten für transformatives Wassermanagement zu ermöglichen? Zur Stärkung der Demokratie sollte auch erforscht werden, wie auch schwierige und hoch komplexe Themen bezüglich regionaler Verschärfungen, die Dynamiken mit globalem Ausmaß entwickeln, mit Wähler:innen so reflektiert werden können, dass klimastabilisierende und sozialverträgliche Politiken möglich sind.



Kernbotschaften

Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit wahren

Bereits heute treten weltweit immer wieder Wasserkrisen auf. In Zukunft ist mit fortschreitenden, beschleunigten Änderungen des globalen Wasserkreislaufs zu rechnen, bei denen sich die Auswirkungen des Klimawandels, die Übernutzung der Wasserressourcen, die ungleiche Verteilung von Wasser, der Verlust von Ökosystemleistungen sowie Gefährdungen durch wasserbezogene Gesundheitsrisiken weiter verschärfen. Dies wird zunehmend in Bedrohungslagen münden, die jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums liegen. In Kombination mit bereits heute bestehenden Herausforderungen der Wassernutzung können sie sich zu regionalen Wassernotlagen zuspitzen. Im Extremfall ergeben sich Situationen, in denen Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten, gesellschaftliche Strukturen und Ökosysteme substanziell destabilisiert werden und Handlungsspielräume schlichtweg nicht mehr existieren. Lebensgrundlagen gehen verloren.

Um Handlungsspielräume zu erhalten, den Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit möglichst zu vergrößern und eine stärkere Resilienz zu schaffen, sind zunehmend vorausschauende Anpassungsmaßnahmen erforderlich, die Wasserversorgung und Wasserqualität sichern. Konkret bedeutet dies die Bereitschaft zu radikaler Umsteuerung, was auch die Initiierung und Begleitung von Strukturwandel voraussetzt, etwa durch Landnutzungs-, Industrie-, Siedlungs- und Infrastrukturpolitik. Sollte dies nicht gelingen und helfen auch transformative Maßnahmen nicht mehr weiter, ist gegebenenfalls ein geordneter rechtzeitiger Rückzug die letzte Gestaltungsoption.

Dies sind bedrohliche Muster mit planetarer Dimension. Es ist daher von höchster Dringlichkeit, das Thema Wasser höher auf der internationalen Agenda zu verankern. Das derzeitige starke Momentum durch die UN-Wasserkonferenzen 2023, 2026 und 2028 sollte von den Regierungen genutzt werden, um weltweit durch umfassende Vorsorge einen ausreichenden Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit einzuhalten. Kurzfristig sollten effektive

Strategien für ein resilientes Wassermanagement entwickelt werden, die mittelfristig die weltweite Kooperation stärken und langfristig in ein von der Staatengemeinschaft getragenes Wasserabkommen münden.

Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension antizipieren und abwenden

Auf allen Kontinenten zeichnen sich regionale Wassernotlagen ab, die eine große Zahl an Menschen betreffen bzw. große Naturräume und deren Biodiversität beeinträchtigen. Von der Gletscherschmelze im Himalaya, massiven Sturzfluten in Brasilien, der kontinuierlich voranschreitenden Landdegradation in Subsahara-Afrika, extremen Hitzewellen und langanhaltenden Trockenperioden in Kanada oder Südeuropa bis hin zur Erschöpfung nord-amerikanischer Süßwasseraquifere oder Hochwasserereignissen in Europa einschließlich Deutschland lassen sich verschiedene Muster erkennen, die sich auch in anderen Weltregionen wiederholen. Durch gemeinsam genutzte Flusseinzugsgebiete und Aquifere, veränderte Verdunstungs- und Niederschlagsmuster, Handelsbeziehungen oder Migration können sie jeweils weitreichende, auch transregionale Folgen haben und in ihrer Summe eine globale Notlage nach sich ziehen (z. B. eine Ernährungs- oder Flüchtlingskrise).

Daher sollte international eine Water Mapping Initiative angestoßen werden, um krisenhafte Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und kontinuierlich zu begleiten, die Weltgemeinschaft zu informieren und vorsorgende Handlungsstrategien im Rahmen der UN zu entwickeln. Zudem sollte ein systematischer internationaler Austausch über wirkungsvolle Anpassungs- und Resilienzstrategien erfolgen. Anzustreben ist eine Internationale Wasserstrategie, um diesen Herausforderungen, vor denen alle Staaten stehen, als Weltgemeinschaft zu begegnen.

Klimaresilientes Wassermanagement umsetzen und naturnahe Wasserqualität erhalten

Infrastrukturen und Managementansätze müssen sich den Veränderungen lokaler Wasserhaushalte und dem zunehmenden Auftreten von Extremereignissen anpassen. Für Planung und Betrieb sind daher nicht nur Gegenwartsdaten relevant, die Bewertung von Maßnahmen erfordert auch einen langfristigen Blick, der die kontinuierliche Veränderungsdynamik im Wasserkreislauf und die neue Qualität der Unsicherheit berücksichtigt. Im Kern geht es darum, den sich global ändernden Wasserkreislauf lokal zu verlangsamen und durch transformative Anpassungsstrategien langfristig klimaresilientere Lösungen zu etablieren. Grünes Wasser – und damit die Wiederherstellung und Bewahrung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts – spielt eine Schlüsselrolle zur Stabilisierung lokaler und regionaler Wasserdargebote. Es sollte als Schutzgut in internationales und deutsches Wasserrecht aufgenommen werden. So sollte grünes Wasser elementarer Bestandteil des wasserrechtlichen Bewirtschaftungsmessens in Deutschland werden. Daraus leitet sich ab, dass nicht allein in grauen Infrastrukturen und blauem Wasser gedacht werden kann. Das Portfolio möglicher Maßnahmen und ihrer Kombinationen sollte noch stärker erweitert werden. Infrastruktur und natürliche sowie technologische Wassermanagementsysteme müssen viel mehr als bisher in der Lage sein, Pfadabhängigkeiten zu vermeiden, Wassermengen zu puffern, kontinuierlich nachzusteuern und so flexibel auf Veränderungen zu reagieren. Diese neuen Herausforderungen für das Wassermanagement müssen sich auch in Budget- und Kompetenzzuweisungen niederschlagen.

Zur Sicherung der Wasserqualität ist eine konsequente Umsetzung des Zero-Pollution-Ansatzes und des Leitbilds einer Kreislaufwasserwirtschaft notwendig, unter Einbeziehung gesunder Ökosysteme. Kernelemente sind die wirkungsvolle Reduktion des Eintrags persistenter Schadstoffe, die Stärkung der Selbstreinigungskraft natürlicher und künstlicher Gewässer, die Entwicklung von Reinigungs- und Kreislaufverfahren parallel zur Entwicklung und Anwendung neuer Stoffe sowie eine Verbesserung der Datenverfügbarkeit der Stoffkreisläufe im Transportmedium Wasser. Auch bedarf es der Entwicklung tierversuchsunabhängiger Testverfahren für die Beurteilung der Wirkungen neuer Stoffe auf Natur und Mensch, insbesondere automatisierter Biotestverfahren und KI-gestützter Computermodelle. Diese müssen die Komplexität von Mischungen berücksichtigen und mit chemischen Innovationen Schritt halten. Wirtschaftliche Akteure sollten bei der Entwicklung notwendiger Verfahren und Stoffe für die Aufreinigung und deren Markteinführung gezielt durch die Schaffung innovationsfreundlicher

Rahmenbedingungen unterstützt werden.

Der WBGU empfiehlt, bei der Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zur Schaffung eines klimaresilienten und sozial ausgewogenen Wassermanagements vier Anforderungen zu berücksichtigen:

1. Die Wirksamkeit von Maßnahmen sollte zum einen im Hinblick auf spezifische Ziele und zum anderen bezüglich ihres Beitrags für die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts beurteilt werden.

2. Weiterhin sollte die Eignung und Machbarkeit von Maßnahmen kontextspezifisch unter Berücksichtigung technischer Limitationen, ihres Flächen- und sonstigen Ressourcenbedarfs (auch unter Beachtung weiterer Schutzziele, z. B. Klima- und Biodiversitätsschutz) sowie sich im Zeitverlauf verändernder Rahmenbedingungen analysiert werden.

3. Mögliche Mehrgewinne für Klima- und Biodiversitätsschutz sowie Gesundheit, soziale und wirtschaftliche Vorteile von Maßnahmen sowie Effekte auf die Verringerung von Ungleichheiten sollten antizipiert, evaluiert und bei der Beurteilung von Maßnahmen berücksichtigt werden.

4. Um Fehlanpassungen und weitere nicht intendierte wasserbezogene, ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Konsequenzen zu vermeiden, sollten möglichst alle Auswirkungen von Maßnahmen auf verschiedenen Zeitskalen (heute, bis 2050 und darüber hinaus) durch einen systemischen und transdisziplinären Ansatz identifiziert, evaluiert und berücksichtigt werden.

Integrierte Klima-, Biodiversitäts- und Sozialpolitik ist effektive Wasserpolitik

Effektive Wasserpolitik erfordert, globale Treiber, die direkt auf den globalen Wasserkreislauf wirken, in Grenzen zu halten: Dafür ist eine ambitionierte Klimapolitik einschließlich der Einhaltung der Ziele des Pariser Abkommens Voraussetzung. Die Änderungen des globalen und lokalen Wasserhaushalts durch den Klimawandel können nur so begrenzt werden. Ebenso zentral ist die Umsetzung des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal (GBF), um die elementare Rolle der Natur im globalen Wasserhaushalt zu schützen. Je früher gehandelt wird, desto mehr Handlungsoptionen bestehen.

Eine integrierte Governance für klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement kann jedoch nur gelingen, wenn eine enge Koordination zwischen Politikfeldern sowohl in Deutschland als auch auf EU-Ebene, multilateral im Rahmen der Vereinten Nationen sowie im G7- und G20-Kontext sichergestellt ist. Voraussetzung für eine effektive Wasserpolitik ist insbesondere die Abstimmung der internationalen Klima- und Biodiversitätspolitik mit globaler Sozial-, Wirtschafts- und

Handelspolitik. Dies sind die zentralen Politikfelder für die Erhaltung natürlicher Lebensgrundlagen sowie die Bekämpfung sozialer Ungleichheiten – zwischen sozialen Gruppen, Gesellschaften und Weltregionen. Von der Bewältigung der damit verbundenen Herausforderungen hängt es ab, ob Arbeitsmärkte und soziale Sicherungssysteme Bestand haben, eng mit der Natur verbundene Praktiken des Lebensunterhalts gesichert werden können und die Erhaltung natürlicher Lebensgrundlagen weltweit gelingen kann, so dass für jüngere und künftige Generationen Zukunftsoptionen vor Ort möglich sein werden. Insofern ist eine Ressort-, Politikfeld-, Regionen- und Governanceebenen übergreifende Koordination und Kooperation von zentraler Bedeutung. Integrierte Politikgestaltung für klimaresilientes Wassermanagement, für Wohlstandssicherung bei gleichzeitiger Umkehr der Klima- und Biodiversitätskrisen ist in einer aufgeheizten Welt die Voraussetzung für eine WasserZukunft ohne existenzielle Gefährdungen menschlichen Lebens.

Transformatives WasserWissen: Vorausschauende und begleitende Wissenschaft praktizieren

Die Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs durch Klimawandel und stärkere Beanspruchung des Menschen schreiten unaufhaltsam fort. Die Annahme von Stationarität, also die Vorstellung, dass natürliche Systeme auf der Grundlage empirischer Beobachtungen innerhalb eines definierten Zeitfensters eine vorhersagbare Variabilität aufweisen, ist nicht mehr tragfähig. Die Unsicherheit über zukünftige Verfügbarkeiten steigt.

Hier ist die Wissenschaft gefordert: Sie sollte Projektionen und Szenarien zu Wasserqualität und -darbgebot entwickeln und zur Verfügung stellen sowie die Informationen über zu erwartende Auswirkungen des Klimawandels mit lokalen Daten und Prognosen über die Wassernutzung und kontextspezifischem Erfahrungswissen zusammenbringen. Diese Einschätzungen können die Basis sein für den sozial ausgewogenen Umgang mit ökologischen, klimatischen, politischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen und Verschärfungen. Dies erfordert die Entwicklung technologischer, sozialer und institutioneller Lösungsansätze, die in den jeweiligen Umsetzungskontexten gesellschaftlich angepasst sind und klimaresilientes Wassermanagement möglich machen.

Es bedarf also, neben der interdisziplinären Forschung zu den Verschärfungen im Wasserbereich selbst, transdisziplinärer Ansätze, um passfähige Lösungs- und Managementansätze zu entwickeln. Als Teil der transformativen Anpassung erfordert dies innovative Ansätze für die kontinuierliche Begleitung von Anpassungsstrategien und den Umgang mit großskaligen und disruptiven

Änderungen der Wasserverfügbarkeit und zunehmenden Extremereignissen sowie vorsorgendes Handeln für den Schutz der Wasserqualität. Dort, wo Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden, reduzieren sich Handlungsmöglichkeiten akut auf ein reaktives Krisen- und Katastrophenmanagement. Auch diese gilt es frühzeitig zu antizipieren.

Mit der Gesellschaft, nicht gegen sie: der gestaltende Staat und die selbstorganisierte Gesellschaft in der Verantwortung

Ziel von Wasserpolitik muss auf jeder Politikebene sein, Wasserressourcen so weit wie möglich zu bewahren, nachhaltig zu nutzen und zu regenerieren. Eine nachhaltige Nutzung unter den sich verschärfenden Rahmenbedingungen beinhaltet insbesondere, die sich verändernde Ressource Wasser angemessen zu verteilen – auch zwischen Mensch und Natur. Nutzungskonflikte müssen mit Hilfe eines Abwägens eröffnenden staatlichen oder selbstorganisierten Wassermanagements unter Beteiligung von Betroffenen (Stakeholder, Zivilgesellschaft) gelöst werden. Wasser ist lebensstiftende Ressource und darf nicht zum politischen Spielball werden. Wassermanagement ist somit ein wichtiger Faktor für Demokratieschutz und Friedenssicherung.

Eine nachhaltige WasserZukunft setzt voraus, dass Ziele und Verantwortung nicht allein vom Staat getragen werden, sondern ebenso von Wirtschaft und Gesellschaft. Der Staat muss dafür die Voraussetzungen schaffen und einen politischen und regulierenden Rahmen setzen, um den Wert von Wasser auf allen Ebenen von Gesellschaft und Wirtschaft zu verankern. Ein solcher Rahmen umfasst sowohl eine Bildungsoffensive für einen verantwortlichen Umgang mit Wasser als auch die Schaffung von Handlungsspielräumen für eine klimaresiliente Wasserversorgung und -nutzung. Staatliche wie private lokale Wasserakteure müssen organisatorisch und finanziell in die Lage versetzt werden, zukünftige Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen. Unternehmen müssen mit den notwendigen Informationen und Anreizen versehen werden, um auch überregional ihrer Verantwortung für eine nachhaltige Wassernutzung gerecht zu werden. Wasser als wertvolle Ressource sollte konsequent und sozial ausgewogen bepreist werden, um eine effiziente und nachhaltige lokale ebenso wie globale Nutzung zu fördern. Zudem sollten Anreize geschaffen werden, privates Kapital als Ergänzung der öffentlichen Finanzierung zu gewinnen. Die durch die Aktivierung privater Investitionen und Erhöhung öffentlicher Einnahmen gewonnenen Finanzierungsspielräume sind für die Anpassung wasserbezogener Infrastrukturen an den Klimawandel dringend erforderlich. Dabei sollte angesichts

der erforderlichen Anpassungsstrategien und der Notwendigkeit einer beschleunigten Umsetzung zugleich die bestehende gesellschaftliche Selbstorganisation zum Umgang mit Wasser gestärkt werden – durch einen geeigneten rechtlichen Rahmen sowie organisatorische und gegebenenfalls auch finanzielle Unterstützung nicht-staatlicher Akteure. Kooperationsplattformen können lokale Wasser- und Landnutzer:innen, staatliche, zivilgesellschaftliche und wissenschaftliche Akteure zusammenbringen um Wissen zu teilen sowie Strategien und finanzielle Ausgleichs- bzw. Finanzierungsmodelle zu entwickeln. Beispiele sind Wasserfonds, in denen Akteure aus Städten bzw. Kommunen und deren Wassereinzugsgebieten zusammenkommen. Das Zusammenspiel von staatlicher und selbstorganisierter Wassergovernance und somit auch eine den gewachsenen gesellschaftlichen, infrastrukturellen und ökologischen Realitäten vor Ort entsprechende Verbindung von Top-down- und Bottom-up-Ansätzen in der Planung und Umsetzung des Wassermanagements ist von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige und governanceebenenübergreifende und kohärente Wasserbewirtschaftung.

Um neue Akteure wie Land- und Forstwirt:innen für den Schutz und die Bewirtschaftung insbesondere des grünen Wassers zu gewinnen, sind entsprechende Motivation und Anreize erforderlich. Auf finanzieller Seite umfasst dies sowohl eine Neuausrichtung von Subventionen als auch Entlohnungsmodelle, die den gesellschaftlichen und ökologischen Mehrwert reflektieren. Darüber hinaus muss den relevanten Akteuren und der Öffentlichkeit der Wert einer klimaresilienten Wasserversorgung für Mensch und Natur besser vermittelt werden. Insbesondere Landwirt:innen, die eine Schlüsselrolle bei der Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts spielen, sollten in dieser Funktion Wertschätzung erfahren und unterstützt werden.

International Verantwortung übernehmen – Internationale Wasserstrategie entwickeln

Die internationale Wassergovernance muss sich auf fortschreitende und beschleunigte Änderungen im globalen Wasserkreislauf und daraus resultierende Verschärfungen wasserbezogener Probleme einstellen. Dazu muss Wasser als Querschnittsthema in vielen Foren mit bedacht werden – u. a. Klima, Biodiversität, Desertifikation, Verschmutzung, soziale Ungleichheit und Armut. Es braucht aber auch einen eigenen Prozess und politische Aufmerksamkeit. Deutschland sollte eine Führungsrolle in der internationalen Wassergovernance einnehmen, die Kapazitäten an den Schnittstellen stärken, internationale Kooperation fördern und mit Anpassungsstrategien für ein klimaresilientes Wassermanagement vorangehen.

Die für 2026 und 2028 geplanten UN-Wasserkonferenzen sollten gut vorbereitet werden. Auf Ebene der Bundesregierung bedeutet dies, Wasser als Thema zur Chefsache zu machen, es als prioritäres Politikfeld im ressortübergreifenden Austausch unter Federführung durch das BMUV zu identifizieren und die deutschen strategischen Schwerpunkte früh in die Gespräche auf Ebene der Europäischen Union zu tragen. Hier bietet es sich an, den Rahmen des Green Deals zu nutzen und diesen über einen Wasser-Fokus auch in einer 2024 neu bestellten Europäischen Kommission zu stärken, gleichzeitig aber auch die Team-Europe-Initiative zu nutzen, um die EU-weit koordinierte Politikgestaltung im Bereich „Wasser“ voranzutragen. Auf multilateraler Ebene bietet es sich an, zum einen die 2024 im Rahmen der G7 beschlossene Wasserkoalition als Plattform zu nutzen, um frühzeitig Einigkeit über strategische Ziele, Zeitrahmen, Finanzen und institutionelle Aufhängung im Bereich der Wassergovernance für klimaresilientes und sozial ausgewogenes Wassermanagement herzustellen. Insbesondere die G7-Präsidentschaft Kanadas im Jahr 2025 sollte genutzt werden, um die Wasserkoalition weiter auszugestalten und ihre Schwerpunktsetzungen sukzessive in die Water Dialogues in der G20 zu tragen. Gerade die G20-Präsidentschaft Südafrikas im Jahr 2025 bietet hier ein weiteres politisches Gelegenheitsfenster.

Der WBGU empfiehlt, bis 2030 eine Internationale Wasserstrategie mit regionalen Plattformen zu erarbeiten. Ziele und Maßnahmen der Strategie sollten auch in zwischenstaatliche Wirtschafts- und Handelsbeziehungen einfließen, um Synergien zwischen dem Schutz der Wasserressourcen sowie der Unterstützung von klimaneutraler Entwicklung und Ernährungssicherheit zu ermöglichen. Die Strategie sollte langfristig zu einem eigenen globalen Abkommen für Wasser – vergleichbar den Rio-Konventionen – weiterentwickelt werden.

Ziel ist es somit, über diese verschiedenen Plattformen die Schwerpunktsetzung und strategische Ausgestaltung der UN-Wasserkonferenzen zunächst mit gleichgesinnten Ländern (G7), sowie in einem nächsten Schritt mit den großen Mitteleinkommensländern (G20) vorzubereiten und als umfangreiches Politikprogramm für eine friedliche WasserZukunft auf einem aufgeheizten Planeten in die Planungen zu den UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 zu tragen. Diese Konferenzen benötigen Unterstützung durch ein international divers zusammengesetztes, wissenschaftliches Expert:innengremium (Water Mapping Initiative), das kritische wasserrelevante Veränderungen für Ökosysteme und Siedlungsräume in unterschiedlichen Weltregionen sowie drohende Wassernotlagen aufzeigt.

Neben dem Bewusstsein für die neue Dimension der wasserbezogenen Herausforderungen und der gemeinsamen Betroffenheit werden zudem Anreize für Staaten benötigt, sich an der internationalen Zusammenarbeit zu

beteiligen. Ein solcher Anreiz besteht zunächst in einem besseren Verständnis der komplexen Interdependenzen, die u. a. durch grenzüberschreitenden atmosphärischen Wassertransport zwischen Staaten (Niederschlags- und Verdunstungseffekte) oder den virtuellen Wasserhandel bestehen, aber auch der Aussicht, dass diese interessen-gerecht geregelt werden. Dabei sollten für alle Seiten vorteilhafte Unterstützungsmaßnahmen und finanzielle Ausgleichsmechanismen entwickelt werden und der für grünes Wasser zentrale Landnutzungssektor besonders im Fokus stehen.

..... **Nationale Wasserstrategie in den internationalen Diskurs einbringen**

Die Nationale Wasserstrategie der deutschen Bundesregierung mit der darin formulierten Vision für die Zukunft und daraus abgeleiteten Handlungsbedarfen und Maßnahmen ist ein großer Schritt zur Vermeidung regionaler Wassernotlagen, der international Beachtung verdient. Sie wird aber nur dann wirkungsvoll, wenn sie langfristig planbar und umfassend mit Ressourcen ausgestattet und umgesetzt wird, auf nationaler Ebene ebenso wie in der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit. Das Ausmaß der Herausforderungen, die vor uns liegen, ist auch durch die Nationale Wasserstrategie noch nicht gänzlich erfasst. Dies gilt vor allem mit Blick auf Anerkennung und Umgang mit den Grenzen der Beherrschbarkeit, den Verlust von Stationarität oder die Anerkennung und notwendige aktive Bewirtschaftung grünen Wassers. Das bedeutet, dass Systeme zur Bereitstellung und Nutzung von Wasser angesichts bisher ungekannter Schwankungen und nicht genau prognostizierbarer, fortlaufender Veränderungen resilient erhalten und wissenschaftsbasiert neu aufeinander abgestimmt werden müssen. Diese Aspekte sollten in der Ressortforschung sowie dem Forschungsprogramm der Bundesregierung (z. B. Wasser: N – Forschung und Innovation für Nachhaltigkeit) Berücksichtigung finden.

Darüber hinaus ist die Nationale Wasserstrategie mit einer Reihe anderer nationaler Strategien und gesetzlichen Vorgaben der Bundesregierung verknüpft, mit deren Maßnahmen hohe Synergieeffekte für den Wasserbereich bestehen – etwa dem Klimaschutzgesetz, dem Klimaanpassungsgesetz, der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, der Nationalen Sicherheitsstrategie oder dem Programm Forschung für Nachhaltigkeit. Dies macht eine ressortübergreifende Abstimmung und Koordination erforderlich.

Literatur

- Abarzúa, G. E. B. und Glückler, J. (2023): Network Governance at the Margin of the State: Rural Drinking Water Communities in Chile. *Environmental Management* 71 (2), 451–464. <https://www.doi.org/10.1007/s00267-022-01760-2>.
- Abraham, A. und Chakraborty, P. (2020): A review on sources and health impacts of bisphenol A. *Reviews on Environmental Health* 35 (2), 201–210. <https://www.doi.org/10.1515/reveh-2019-0034>.
- Abramovsky, L. F., Andres, L. A., Joseph, G., Rud, J. P., Sember, G. E. und Thibert, M. D. (2020): Study of the distributional performance of piped water consumption subsidies in 10 developing countries. Washington, D.C.: World Bank. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-9245>.
- Acreman, M. und Holden, J. (2013): How Wetlands Affect Floods. *Wetlands* 33 (5), 773–786. <https://www.doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>.
- ADB – Asian Development Bank (2021): What Is Citywide Inclusive Sanitation and Why Is It Needed? Metro Manila, Philippines: ADB. <https://dx.doi.org/10.22617/TIM210395-2>.
- Adediji, A. A., Häggblom, M. M. und Babalola, O. O. (2020): Sustainable agriculture in Africa: Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to the rescue. *Scientific African* 9, e00492. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00492>.
- Adeel, M., Zain, M., Shakoor, N., Ahmad, M. A., Azeem, I., Aziz, M. A., Supe Tulcan, R. X., Rathore, A., Tahir, M., Horton, R., Xu, M. und Yukui, R. (2023): Global navigation of Lithium in water bodies and emerging human health crisis. *npj Clean Water* 6, 33. <https://www.doi.org/10.1038/s41545-023-00238-w>.
- Adegbeye, M. J., Ravi Kanth Reddy, P., Obaisi, A. I., Elghandour, M. M. M. Y., Oyebamiji, K. J., Salem, A. Z. M., Morakinyo-Fasipe, O. T., Cipriano-Salazar, M. und Camacho-Díaz, L. M. (2020): Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations – An overview. *Journal of Cleaner Production* 242, 118319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118319>.
- AfDB – African Development Bank, UNEP – United Nations Environment Programme und GRID-Arendal (2020): Sanitation and Wastewater Atlas of Africa. Abidjan, Nairobi, Arendal: AfDB, UNEP, GRID-Arendal.
- Agarwal, A., de los Angeles, M. S., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Gonzalez-Villarreal, F., Jönch-Clausen, T., Ait Kadi, M., Kindler, J., Rees, J. A., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M. und Wright, A. (2000): Integrated Water Resources Management. TAC Background Paper No. 4. Stockholm: Global Water Partnership (GWP). <https://hdl.handle.net/10535/4986>.
- Agusdinata, D. B., Liu, W., Eakin, H. und Romero, H. (2018): Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda. *Environmental research letters* 13, 123001. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1>.
- Aksnes, D. W. und Sivertsen, G. (2023): Global trends in international research collaboration, 1980–2021. *Journal of Data and Information Science* 8 (2), 26–42. <https://www.doi.org/10.2478/jdis-2023-0015>.
- Alaerts, G. (2019): Financing for Water—Water for Financing: A Global Review of Policy and Practice. *Sustainability* 11 (3), 821. <https://www.doi.org/10.3390/su11030821>.
- Albert, J. S., Destouni, G., Duke-Sylvester, S. M., Magurran, A. E., Oberdorff, T., Reis, R. E., Winemiller, K. O. und Ripple, W. J. (2021): Scientists’ warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio* 50 (1), 85–94. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01318-8>.
- Albrecht, T. R., Crootof, A. und Scott, C. A. (2018): The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters* 13, 043002. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>.
- Allan, C., Curtis, A., Stankey, G. und Shindler, B. (2008): Adaptive Management and Watersheds: A Social Science Perspective 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 44 (1), 166–174. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00145.x>.
- Allan, J. A. (1998): Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Ground water* 36 (4), 545–546. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1998.TB02825.X>.
- Allison, E. und Mandler, B. (2018): Spills in Oil and Natural Gas Fields: Spill types, numbers, sizes, effects, and mitigation/cleanup efforts. *Petroleum and the Environment* 14/24. Alexandria: American Geosciences Institute (AGI). <https://www.americangeosciences.org/geoscience-currents/spills-oil-and-natural-gas-fields>.
- Almeida, R. M., Schmitt, R., Grodsky, S. M., Flecker, A. S., Gomes, C. P., Zhao, L., Liu, H., Barros, N., Kelman, R. und McIntyre, P. B. (2022): Floating solar power: evaluate trade-offs. *Nature* 606, 246–249. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01525-1>.
- Alves, A., Gersonius, B., Sanchez, A., Vojinovic, Z. und Kapelan, Z. (2018a): Multi-criteria Approach for Selection of Green and Grey Infrastructure to Reduce Flood Risk and Increase CO-benefits. *Water Resources Management* 32 (7), 2505–2522. <https://www.doi.org/10.1007/s11269-018-1943-3>.
- Alves, A., Patiño Gómez, J., Vojinovic, Z., Sánchez, A. und Weesakul, S. (2018b): Combining Co-Benefits and Stakeholders Perceptions into Green Infrastructure Selection for Flood Risk Reduction. *Environments* 5 (2), 29. <https://www.doi.org/10.3390/environments5020029>.
- Alves, C. A., Vicente, A. M. P., Calvo, A. I., Baumgardner, D., Amato, F., Querol, X., Pio, C. und Gustafsson, M. (2020): Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres. *Atmospheric Environment* 224, 117252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117252>.
- Ambade, B., Sethi, S. S., Kumar, A., Sankar, T. K. und Kurwadkar, S. (2021): Health Risk Assessment, Composition, and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Drinking Water of Southern Jharkhand, East India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 80 (1), 120–133. <https://www.doi.org/10.1007/s00244-020-00779-y>.
- AMCOW – African Ministers’ Council on Water (2021): African Sanitation Policy Guidelines. Abuja, Nigeria: AMCOW.

- Amos, C. B., Audet, P., Hammond, W. C., Bürgmann, R., Johanson, I. A. und Blewitt, G. (2014): Uplift and seismicity driven by groundwater depletion in central California. *Nature* 509 (7501), 483–486. <https://www.doi.org/10.1038/nature13275>.
- Andres, L. A., Thibert, M., Lombana Cordoba, C., Danilenko, A. V., Joseph, G. und Borja-Vega, C. (2019): Doing more with less: Smarter subsidies for water supply and sanitation. Washington, D.C.: World Bank.
- Angelovski, I., Connolly, J. J. T., Pearsall, H., Shokry, G., Checker, M., Maantay, J., Gould, K., Lewis, T., Maroko, A. und Roberts, J. T. (2019): Why green “climate gentrification” threatens poor and vulnerable populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (52), 26139–26143. <https://www.doi.org/10.1073/pnas.1920490117>.
- Anik, A. H., Hossain, S., Alam, M., Sultan, M. B., Hasnine, M. T. und Rahman, M. M. (2021): Microplastics pollution: A comprehensive review on the sources, fates, effects, and potential remediation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 16, 100530. <https://www.doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100530>.
- Antonelli, M., Laio, F. und Tamea, S. (2017): Water Resources, Food Security and the Role of Virtual Water Trade in the MENA-Region. In: Behnassi, M. und McGlade, K. (Hrsg.): *Environmental Change and Human Security in Africa and the Middle East*. Cham: Springer, 199–217. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45648-5_11.
- Anyanwu, I. N., Beggel, S., Sikoki, F. D., Okuku, E. O., Unyimadu, J.-P. und Geist, J. (2023): Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports* 13 (1), 14079. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40995-9>.
- AQUASTAT – FAO’s Global Information System on Water and Agriculture (2024): Water use: Pressure on water resources (worldwide). Rom: FAO. <https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en&share=f-8fd8d517-0a8f-4c8b-87c0-caf57a495585>, abgerufen am 15.07.2024.
- Araral, E. und Yu, D. (2013): Comparative water law, policies, and administration in Asia: Evidence from 17 countries. *Water Resources Research* 49 (9), 5307–5316. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20414>.
- Arden, S. und Ma, X. (2018): Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. *Science of the Total Environment* 630, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>.
- Arnbjerg-Nielsen, K., Leonardsen, L. und Madsen, H. (2015): Evaluating adaptation options for urban flooding based on new high-end emission scenario regional climate model simulations. *Climate Research* 64 (1), 73–84. <https://www.doi.org/10.3354/cr01299>.
- Arnold, J. L., Cauthorn, T., Eckert, J., Klein, C. und Rink, S. (2023): Let’s talk numbers: EU Taxonomy reporting by German companies. Berlin: econsens. https://econsense.de/wp-content/uploads/2023/07/Lets-talk-numbers_EU-Taxonomy-reporting-by-German-companies.pdf.
- Arojoye, O. A., Oyagbemi, A. A., Ola-Davies, O. E., Asaolu, R. O., Shittu, Z. O. und Hassan, B. A. (2021): Assessment of water quality of selected rivers in the Niger Delta region of Nigeria using biomarkers in *Clarias gariepinus*. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 22936–22943. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11879-6>.
- Arvonen, V., Kibocha, S. N., Katko, T. S. und Pietilä, P. (2017): Features of Water Cooperatives: A Comparative Study of Finland and Kenya. *Public Works Management & Policy* 22 (4), 1–22. <https://doi.org/10.1177/1087724X17715267>.
- Atelier Dreiseitl GmbH und Rambøll Group (2013): *Cloudburst Economics – An Urban Flood Protection Masterplan for the Central City Catchments of Lådegårds-Åen und Vesterbro in Copenhagen, Denmark*. Überlingen, Kopenhagen: Atelier Dreiseitl GmbH, Rambøll.
- Audet, J., Zak, D., Bidstrup, J. und Hoffmann, C. C. (2020): Nitrogen and phosphorus retention in Danish restored wetlands. *Ambio* 49 (1), 324–336. <https://www.doi.org/10.1007/s13280-019-01181-2>.
- aus der Beek, T., Weber, F.-A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A. und Küster, A. (2016): Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35 (4), 823–835. <https://doi.org/10.1002/etc.3339>.
- Ayilara, M. S., Adeleke, B. S., Akinola, S. A., Fayose, C. A., Adeyemi, U. T., Gbadegesin, L. A., Omole, R. K., Johnson, R. M., Uthman, Q. O. und Babalola, O. O. (2023): Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology* 14, 1258968. <https://www.doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>.
- Ayres, A., Peterson, C. und Rosser, A. (2023): *Water Use in California’s Communities*. San Francisco, Kalifornien: Public Policy Institute of California (PPIC).
- Azam, M. F., Kargel, J. S., Shea, J. M., Nepal, S., Haritashya, U. K., Srivastava, S., Maussion, F., Qazi, N., Chevallier, P., Dimri, A. P., Kulkarni, A. V., Cogley, J. G. und Bahuguna, I. (2021): Glaciohydrology of the Himalaya-Karakoram. *Science* 373 (6557), eabf3668. <https://www.doi.org/10.1126/science.abf3668>.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2012): *Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro)*. Bern: BAFU.
- Bai, Y., Muralidharan, N., Sun, Y.-K., Passerini, S., Whittingham, M. S. und Belharouak, I. (2020): Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of Battery Identity Global Passport. *Materials Today* 41, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.001>.
- Bakken, T. H., Modahl, I. S., Engeland, K., Raadal, H. L. und Arnøy, S. (2016): The life-cycle water footprint of two hydropower projects in Norway. *Journal of Cleaner Production* 113, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.036>.
- Balasubramanian, P., Burchi, F. und Malerba, D. (2023): Does economic growth reduce multidimensional poverty? Evidence from low- and middle-income countries. *World Development* 161, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.106119>.
- Balasubramanya, S. und Buisson, M.-C. (2022): Positive incentives for managing groundwater in the presence of informal water markets: perspectives from India. *Environmental Research Letters* 17, 101001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac914f>.
- Banaszuk, P., Wysocka-Czubaszek, A. und Kamocki, A. K. (2011): Internal eutrophication of restored peatland stream: The role of bed sediments. *Ecological Engineering* 37 (2), 260–268. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.016>.
- Banda, V. D., Dzwauro, R. B., Singh, S. K. und Kanyere, T. (2022): Hydrological Modelling and Climate Adaptation under Changing Climate: A Review with a Focus in Sub-Saharan Africa. *Water* 14 (24), 1–27. <https://doi.org/10.3390/w1424>.
- Barataud, F., Aubry, C., Wezel, A. und Mundler, P. (2014): Management of drinking water catchment areas in cooperation with agriculture and the specific role of organic farming. Experiences from Germany and France. *Land Use Policy* 36, 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.010>.
- Barcellos, D. d. S., Procopiuck, M. und Bollmann, H. A. (2022): Management of pharmaceutical micropollutants discharged in urban waters: 30 years of systematic review looking at opportunities for developing countries. *Science of The Total Environment* 809, 151128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151128>.
- Bardhan, P. (2004): *Scarcity, conflicts, and cooperation: essays in the political and institutional economics of development*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Barreto, A., Santos, J., Calisto, V., Rocha, L. S., Amorim, M. J. B. und Maria, V. L. (2023): Cocktail effects of emerging contaminants on zebrafish: Nanoplastics and the pharmaceutical diphenhydramine. *NanoImpact* 30, 100456. <https://www.doi.org/10.1016/j.impact.2023.100456>.
- Bassi, N., Rishi, P. und Choudray, N. (2010): Institutional organizers and collective action: the case of water users’ associations in Gujarat, India. *Water International* 35 (1), 18–33. <https://doi.org/10.1080/02508060903515275>.

- Bayliss, K. (2014): The Financialization of Water. Review of Radical Political Economics 46 (3), 292–307. <https://www.doi.org/10.1177/0486613413506076>.
- Bearden, B. (2010): The legal regime of the Mekong River: a look back and some proposals for the way ahead, Water Policy. Water Policy 12 (6), 798–821. <https://doi.org/10.2166/wp.2009.060>.
- Bednarek, A. T. (2001): Undamming Rivers: A Review of the Ecological Impacts of Dam Removal. Environmental Management 27 (6), 803–814. <https://doi.org/10.1007/s002670010189>.
- Beek, E. v., Nolte, A. J., Maat, J. t., Fanesca-Sanchez, M., Asselman, N. und Gehrels, H. (2022): Strategic Water Systems Planning – A Framework for Achieving Sustainable, Resilient and Adaptive Managemen. Delft, Niederlande: Deltares. <https://publications.deltares.nl/Deltares234.pdf>.
- Beisheim, M. (2013): Der „Nexus“ Wasser-Energie-Nahrung: wie mit vernetzten Versorgungsrisiken umgehen? SWP-Studie 2013/S 11. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP).
- Bekchanov, M., Lamers, J. P. A. und Martius, C. (2010): Pros and Cons of Adopting Water-Wise Approaches in the Lower Reaches of the Amu Darya: A Socio-Economic View. Water 2 (2), 200–216. <https://www.doi.org/10.3390/w2020200>.
- Belletti, B., Garcia de Leaniz, C., Jones, J., Bizzi, S., Börger, L., Segura, G., Castelletti, A., van de Bund, W., Aarestrup, K., Barry, J., Belka, K., Berkhuysen, A., Birnie-Gauvin, K., Bussetini, M., Carolli, M., Consuegra, S., Dopico, E., Feierfeil, T., Fernández, S., Fernandez Garrido, P., Garcia-Vazquez, E., Garrido, S., Giannico, G., Gough, P., Jepsen, N., Jones, P. E., Kemp, P., Kerr, J., King, J., Lapińska, M., Lázaro, G., Lucas, M. C., Marcello, L., Martin, P., McGinnity, P., O’Hanley, J., Olivo del Amo, R., Parasiewicz, P., Pusch, M., Rincon, G., Rodriguez, C., Royte, J., Schneider, C. T., Tummers, J. S., Vallesi, S., Vowles, A., Verspoor, E., Wanningen, H., Wantzen, K. M., Wildman, L. und Zalewski, M. (2020): More than one million barriers fragment Europe’s rivers. Nature 588 (7838), 436–441. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2>.
- Bellmore, J. R., Pess, G. R., Duda, J. J., O’Connor, J. E., East, A. E., Foley, M. M., Wilcox, A. C., Major, J. J., Shafroth, P. B., Morley, S. A., Magirl, C. S., Anderson, C. W., Evans, J. E., Torgersen, C. E. und Craig, I. S. (2019): Conceptualizing Ecological Responses to Dam Removal: If You Remove It, What’s to Come? BioScience 69 (1), 26–39. <https://www.doi.org/10.1093/biosci/biy152>.
- Bennett, G., Leonardi, A. und Ruef, F. (2017): State of European Markets 2017: Watershed Investments. Washington, D.C.: Forest Trends’ Ecosystem Marketplace.
- Berbel, J. und Expósito, A. (2020): The Theory and Practice of Water Pricing and Cost Recovery in the Water Framework Directive. Water Alternatives 13 (3), 659–673. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol13/v13issue3/602-a13-3-20>.
- Berga, L. (2016): The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review. Engineering 2 (3), 313–318. <https://www.doi.org/10.1016/j.Eng.2016.03.004>.
- Berger, A., Brandi, C., Bruhn, D. und Morin, J.-F. (2017): TREND Analytics: Environmental Provisions in Preferential Trade Agreements. Bonn, Québec: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE), Université Laval. https://www.doi.org/10.23661/trendanalytics_2017_1.0.
- Bergmann, J. (2022): Desert Rose or Fata Morgana? The G5 Sahel and Its Partnership with the European Union. In: Muntschick, J. (Hrsg.): Regionalism in Africa and External Partners: Uneven Relationships and (Un)Intended Effects. Cham: Springer International Publishing, 127–154. https://www.doi.org/10.1007/978-3-031-10702-3_6.
- Bertassello, L., Winters, P. und Muller, M. (2023): Access to global wheat reserves determines country-level vulnerability to conflict-induced Ukrainian wheat supply disruption. Nature Food 4, 1–4. <https://www.doi.org/10.1038/s43016-023-00806-w>.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2024): Moore: Entstehung und Zustand. Bonn: BfN. <https://www.bfn.de/entstehung-und-zustand>, abgerufen am 4.07.2024.
- BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung (2023): Therapiehäufigkeit und Antibiotika Verbrauchsmengen 2022: Entwicklung in zur Fleischerzeugung gehaltenen Rindern, Schweinen, Hühnern und Puten. Berlin: BfR.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020): Kupfer – Informationen zur Nachhaltigkeit. Hannover: BGR. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer.html.
- Bhalla, G. (2021): How Chennai, Among World’s Wettest Cities, Ran Out of Water. Mumbai: The Times of India. <https://www.indiatimes.com/news/india/how-chennai-among-world-wettest-cities-ran-out-of-water-533587.html>, erschienen am 4.02.2021.
- Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., von Bloh, W., Wijngaard, R. R., Wester, P., Shrestha, A. B. und Immerzeel, W. W. (2019): Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. Nature Sustainability 2 (7), 594–601. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3>.
- Bierkens, M. F. und Wada, Y. (2019): Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. Environmental Research Letters 14 (6), 1–43. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>.
- Biggel, M., Zurfluh, K., Treier, A., Nüesch-Inderbinnen, M. und Stephan, R. (2021): Characteristics of fosA-carrying plasmids in E. coli and Klebsiella spp. isolates originating from food and environmental samples. Journal of Antimicrobial Chemotherapy 76 (8), 2004–2011. <https://www.doi.org/10.1093/jac/dkab119>.
- Bijay, S. und Craswell, E. (2021): Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. SN Applied Sciences 3, 518. <https://www.doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>.
- Biswas, A. K. (2004): Integrated water resources management: a reassessment: a water forum contribution. Water international 29 (2), 248–256. <https://doi.org/10.1080/02508060408691775>.
- Bjornlund, H. (2004): Formal and informal water markets: Drivers of sustainable rural communities? Water resources research 40 (9), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2003WR002852>.
- Blackstock, K. L., Ingram, J., Burton, R., Brown, K. M. und Slee, B. (2010): Understanding and influencing behaviour change by farmers to improve water quality. Science of The Total Environment 408 (23), 5631–5638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.04.029>.
- Blauhut, V., Stoelzle, M., Ahopelto, L., Brunner, M. I., Teutschbein, C., Wendt, D. E., Akstinis, V., Bakke, S. J., Barker, L. J., Bartošová, L., Briede, A., Cammalleri, C., Kalin, K. C., De Stefano, L., Fendeková, M., Finger, D. C., Huysmans, M., Ivanov, M., Jaagus, J., Jakubinský, J., Krakovska, S., Laaha, G., Lakatos, M., Manevski, K., Neumann Andersen, M., Nikolova, N., Osuch, M., van Oel, P., Radeva, K., Romanowicz, R. J., Toth, E., Trnka, M., Urošev, M., Urquijo Reguera, J., Sauquet, E., Stevkov, A., Tallaksen, L. M., Trofimova, I., Van Loon, A. F., van Vliet, M. T. H., Vidal, J.-P., Wanders, N., Werner, M., Willems, P. und Živković, N. (2022): Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management. Natural Hazards and Earth System Sciences 22 (6), 2201–2217. <https://www.doi.org/10.5194/nhess-22-2201-2022>.
- BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2023): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2022. Bonn: BLE.
- BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2024): Unsere Themen: Klima. Bonn: BLE. https://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/klima_node.html, abgerufen am 1.07.2024.
- Blicharska, M., Smithers, R. J., Kuchler, M., Agrawal, G. K., Gutiérrez, J. M., Hassanali, A., Huq, S., Koller, S. H., Marjit, S., Mshinda, H. M., Masjuki, H. H., Solomons, N. W., Staden, J. V. und Mikusiński, G. (2017): Steps to overcome the North–South divide in research relevant to climate change policy and practice. Nature Climate Change 7 (1), 21–27. <https://www.doi.org/10.1038/nclimate3163>.
- Blömer, S., Schoor, B., Baumann, P., Keller, J., Maier, W., Münch, K. und Reinhardt, T. (2023): Potenzial der Abwasserwärmenutzung aus dem Auslauf von Kläranlagen. Lokalisierung von Standorten in Baden-Württemberg. Korrespondenz Abwasser, Abfall 70 (2), 106–113. <https://doi.org/10.3242/kae2023.02.003>.

- Blomkvist, P., Nilsson, D., Juma, B. und Sitoki, L. (2020): Bridging the critical interface: Ambidextrous innovation for water provision in Nairobi's informal settlements. *Technology in society* 60, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101221>.
- Blum, M., Colell, A. und Treichel, K. (2022): Deliberation: Neue Räume für die Aushandlung von Politikoptionen. In: Zilles, J., Drewing, E. und Janik, J. (Hrsg.): *Umkämpfte Zukunft. Zum Verhältnis von Nachhaltigkeit, Demokratie und Konflikt*. Bielefeld: transcript Verlag, 291–312. <https://doi.org/10.14361/9783839463000-016>.
- Blum, M. (2024): Science and citizen deliberation – a promising coalition? *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 1–40. <https://doi.org/10.1080/13511610.2024.2349631>.
- Blum, P., Menberg, K., Koch, F., Benz, S. A., Tissen, C., Hemmerle, H. und Bayer, P. (2021): Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology* 239, 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>.
- Blum, P., Felke, C., von Ondarza, V., Pittelkow, S., Strunz, B., Izoard, C., NDR – Norddeutscher Rundfunk und WDR – Westdeutscher Rundfunk Köln (2023): *Schwere Vorwürfe gegen BMW-Zulieferer*. Hamburg: tagesschau. <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr-wdr/umweltstandards-bmw-zulieferer-kobalt-marokko-100.html>, erschienen am 12.11.2023.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2017): *Nationaler Aktionsplan für nachhaltige Entwicklung - Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Weltaktionsprogramm*. Berlin: BMBF.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020): *Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Zuwendungen für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema „Wasserforschung im Nahen und Mittleren Osten“*. Berlin: BMBF. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2020/06/3038_bekanntmachung, erschienen am 3.06.2020.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021a): *Gut Informiert – RegiKlim unterstützt Klimahandeln vor Ort*. Bonn: BMBF.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021b): *Wasser: N. Research and Innovation for Sustainability*. Bonn: BMBF. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/270264_Wasser_N_en.html.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023): *Zukunftsstrategie Forschung und Innovation*. Berlin: BMBF.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024a): *Globale Ressource Wasser – GRoW*. Berlin: BMBF. <https://bmbf-grow.de/de>, abgerufen am 27.06.2024.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024b): *Forschungsprogramm Wassersicherheit in Afrika (WASA)*. Berlin: BMBF. www.watersecurityafrica.org, abgerufen am 15.07.2024.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024c): *STEER: Erhöhung der Steuerungskompetenz zur Erreichung der Ziele eines integrierten Wassermanagements*. Berlin: BMBF. <https://bmbf-grow.de/de/steer>, abgerufen am 27.06.2024.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024d): *Die Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse“ (WaX)*. Berlin: BMBF. <https://www.bmbf-wax.de>, abgerufen am 27.07.2024.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2024e): *Kompetenzzentren für Klimawandel und angepasstes Landmanagement in Afrika*. Berlin: BMBF. <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/klimakompetenzzentren-afrika.php>, abgerufen am 15.07.2024.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022a): *Digitalisierung in der Landwirtschaft*. Bonn: BMEL. <https://www.bmel.de/DE/themen/digitalisierung/digitalisierung-landwirtschaft.html>, abgerufen am 1.07.2024.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022b): *Digitalisierung in der Landwirtschaft: Chancen nutzen – Risiken minimieren*. Bonn: BMEL.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (2024): *Nitratbericht 2024. Bericht der Bundesrepublik Deutschland gemäß Richtlinie 91/676/EWG zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen*. Bonn, Berlin: BMEL.
- BMJ – Bundesministeriums der Justiz (2023): *Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159, S. 2)*. Berlin: BMJ. https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2023/index.html.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt (2021): *Nationale Wasserstrategie. Entwurf des Bundesumweltministeriums*. Bonn: BMU.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): *Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit*. Bonn: BUMB.
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz und UBA – Umweltbundesamt (2022): *Die Wasserrahmenrichtlinie – Gewässer in Deutschland 2021. Fortschritte und Herausforderungen*. Bonn, Dessau-Roßlau: BMUV, UBA.
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023a): *Wie werden die Maßnahmen, die in der Nationalen Wasserstrategie vorgesehen sind, finanziert? FAQ zur Nationalen Wasserstrategie*. Berlin: BMUV. <https://www.bmu.de/faq/wie-werden-die-massnahmen-die-in-der-nationalen-wasserstrategie-vorgesehen-sind-finanziert>, abgerufen am 1.07.2024.
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023b): *Nationale Wasserstrategie. Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023*. Berlin: BMUV.
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024): *Junge Menschen beteiligen*. Bonn: BMUV. https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Beteiligung/Buergerbeteiligung/Jugendbeteiligung/jugendbeteiligung_node.html, abgerufen am 13.05.2024.
- BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, (2024): *Referentenentwurf - Entwurf eines Gesetzes zur Stärkung der integrierten Stadtentwicklung*, 29.07.2024. Berlin: BMWSB.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2017): *BMZ Wasserstrategie. Schlüssel zur Umsetzung der Agenda 2030 und des Klimaabkommens*. Bonn, Berlin: BMZ.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2023): *Integriertes Wasserressourcenmanagement und Nexus-Ansatz*. Bonn, Berlin: BMZ. <https://www.bmz.de/de/themen/wasser/wasserpolitik/integriertes-wasserressourcenmanagement-und-nexus-ansatz-20636>, abgerufen am 16.10.2023.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2024): *Reform der Weltbankgruppe*. Bonn, Berlin: BMZ. <https://www.bmz.de/de/ministerium/international-organisationen/weltbank/reform-der-weltbankgruppe-147428>, abgerufen am 27.03.2024.
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Pissoneiro, J., Rizzo, A. und Masi, F. (2020): *A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. Science of the total environment* 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>.
- Boboyorov, H., Poos, H. und Schetter, C. (2009): *Beyond the State – Local Politics in Afghanistan*. Bonn: Center for Development Research (ZEF).
- Bodansky, D., Brunnée, J. und Rajamani, L. (2017): *International climate change law*. Oxford: Oxford University Press.
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P. und Marquez, E. (2020): *The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review*. *BMC Public Health* 20 (1), 1875. <https://www.doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0>.

- Boelens, R. und Vos, J. (2012): The danger of naturalizing water policy concepts: Water productivity and efficiency discourses from field irrigation to virtual water trade. *Agricultural Water Management* 108, 16–26. <https://www.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.013>.
- Bogardi, J. J., Gupta, J., Nandalal, K. D. W., Salamé, L., van Nooijen, R. R. P., Kumar, N., Tingsanchali, T., Bhaduri, A. und Kolechkina, A. G. (2021): *Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples*. Cham: Springer Nature.
- Bolan, N., Hoang, S. A., Tanveer, M., Wang, L., Bolan, S., Sooriyakumar, P., Robinson, B., Wijesekara, H., Wijesooriya, M., Keerthanan, S., Vithanage, M., Markert, B., Fränzle, S., Wünschmann, S., Sarkar, B., Vinu, A., Kirkham, M. B., Siddique, K. H. M. und Rinklebe, J. (2021): From mine to mind and mobiles – Lithium contamination and its risk management. *Environmental Pollution* 290, 118067. <https://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118067>.
- Bolch, T., Shea, J. M., Liu, S., Azam, F. M., Gao, Y., Gruber, S., Immerzeel, W. W., Kulkarni, A., Li, H., Tahir, A. A., Zhang, G. und Zhang, Y. (2019): Status and Change of the Cryosphere in the Extended Hindu Kush Himalaya Region. In: Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. und Shrestha, A. B. (Hrsg.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham: Springer Nature, 209–255. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_7.
- Bonet, B., Chaudhary, A., Krause, S., Hoellein, T., Mitrano, D. M. und Lynch, I. (2023): Editorial: Exploring the combined effect of climate change and pollution on freshwater ecosystems. *Frontiers in Environmental Science* 11, 1293169. <https://www.doi.org/10.3389/fenvs.2023.1293169>.
- Bonn, A., Brink, W., Hecker, S., Herrmann, T. M., Liedtke, C., Premke-Kraus, M., Voigt-Heucke, S., Gönner, J. v., Altmann, C. und Bauhus, W. (2022): *White Paper Citizen Science Strategy 2030 for Germany*. Leipzig, Berlin: Helmholtz Association, Leibniz Association, Fraunhofer Society.
- Borchardt, D., Bogardi, J. J. und Ibsch, R. B. (2016): *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Basel: Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7>.
- Bosmans, J., Wanders, N., Bierkens, M. F., Huijbregts, M. A., Schipper, A. M. und Barbarossa, V. (2022): FutureStreams, a global dataset of future streamflow and water temperature. *Scientific data* 9, 307. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01410-6>.
- Bosson, J. B., Huss, M., Cauvy-Fraunie, S., Clement, J. C., Costes, G., Fischer, M., Poulenard, J. und Arthaud, F. (2023): Future emergence of new ecosystems caused by glacial retreat. *Nature* 620 (7974), 562–569. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-023-06302-2>.
- Bostic, D., Mendez-Barrientos, L., Pauloo, R., Dobbin, K. und MacClements, V. (2023): Thousands of domestic and public supply wells face failure despite groundwater sustainability reform in California's Central Valley. *Scientific Reports* 13 (1), 14797. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41379-9>.
- Boyd, D., Pathak, M., van Diemen, R. und Skea, J. (2022): Mitigation co-benefits of climate change adaptation: A case-study analysis of eight cities. *Sustainable Cities and Society* 77, 103563. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103563>.
- Brás, T. A., Seixas, J., Carvalhais, N. und Jägermeyr, J. (2021): Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environmental Research Letters* 16 (6), 065012. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>.
- Brauman, K. A., Garibaldi, L. A., Polasky, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., Brancalion, P. H. S., DeClerck, F., Jacob, U., Mastrangelo, M. E., Nkongolo, N. V., Palang, H., Pérez-Méndez, N., Shannon, L. J., Shrestha, U. B., Strombom, E. und Verma, M. (2020): Global trends in nature's contributions to people. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (51), 32799–32805. <https://www.doi.org/10.1073/pnas.2010473117>.
- Breuer, R. und Gärditz, K. F. (2017): Einleitung und Überblick. In: Breuer, R. und Gärditz, K. F. (Hrsg.): *Öffentliches und privates Wasserrecht*. München: C.H. Beck, Rn. 134, 135.
- Bring, A., Thorslund, J., Rosén, L., Tonderski, K., Åberg, C., Envall, I. und Laudon, H. (2022): Effects on groundwater storage of restoring, constructing or draining wetlands in temperate and boreal climates: a systematic review. *Environmental Evidence* 11 (38), 1–29. <https://www.doi.org/10.1186/s13750-022-00289-5>.
- Brown, A. G., Lespez, L., Sear, D. A., Macaire, J.-J., Houben, P., Klimek, K., Brazier, R. E., Van Oost, K. und Pears, B. (2018): Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews* 180, 185–205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>.
- Brown, C. (2011): *Decision-scaling for robust planning and policy under climate uncertainty*. Washington, D.C.: World Bank.
- Brown, C., Werick, W., Leger, W. und Fay, D. (2011): A decision-analytic approach to managing climate risks: Application to the upper great lakes 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 47 (3), 524–534. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00552.x>.
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M. und Li, K. (2012): Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research* 48 (9), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2011WR011212>.
- Brudler, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Hauschild, M. Z. und Rygaard, M. (2016): Life cycle assessment of stormwater management in the context of climate change adaptation. *Water Research* 106, 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.024>.
- Brunnée, J. (2007): Common Areas, Common Heritage, and Common Concern. In: Bodansky, D., Brunnée, J. und Hey, E. (Hrsg.): *The Oxford Handbook of International Environmental Law*. Oxford: Oxford University Press, 550–573. <https://www.doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199552153.013.0023>.
- Buchert, M., Dolega, P. und Degreif, S. (2020): *Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium*. Darmstadt: Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/oekologische-und-sozio-oekonomische-herausforderungen-in-batterie-lieferketten-graphit-und-lithium>.
- Budding Polo-Ballinas, M., Arumugam, P., Verstand, D., Siegmund-Schultze, M., Keesstra, S., García Chávez, L., de Boer, R. und van Eldik, I. V. (2022): Nature-based Solutions in Food Systems. Review of Nature-based Solutions towards more sustainable agriculture and food production. Discussion Paper. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- BUKEA – Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, (2024): *Gründachförderung. Auf die Dächer – fertig – grün!* Hamburg: BUKEA. <https://www.hamburg.de/foerderung/4364756/gruendachfoerderung/>, abgerufen am 5.06.2024.
- Bullock, A. und Acreman, M. (2003): The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences* 7 (3), 358–389. <https://www.doi.org/10.5194/hess-7-358-2003>.
- BUMV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024): *Exportinitiative Umweltschutz*. Berlin: BUMV. <https://www.exportinitiative-umweltschutz.de/>, abgerufen am 18.06.2024.
- BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2019): *Die Wasserentnahmeentgelte der Länder*. Berlin: BUND.
- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N. und Tomaszewska, B. (2021): State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination* 508, 115035. <https://www.doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>.
- Buras, A., Rammig, A. und Zang, C. S. (2020): Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences* 17 (6), 1655–1672. <https://www.doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>.
- Burchi, F. und Malerba, D. (2023): Are women poorer? A cross-country analysis of gender differentials in multidimensional poverty. In: Wagle, U. (Hrsg.): *Research Handbook on Poverty and Inequality*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 103–117. <https://doi.org/10.4337/9781800882300.00014>.

- Burls, N. J., Blamey, R. C., Cash, B. A., Swenson, E. T., Fahad, A. a., Bopape, M.-J. M., Straus, D. M. und Reason, C. J. (2019): The Cape Town "day zero" drought and Hadley cell expansion. *Npj Climate and Atmospheric Science* 2 (1), 27. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0084-6>.
- Calliari, E., Castellari, S., Davis, M., Linnerooth-Bayer, J., Martin, J., Mysiak, J., Pastor, T., Ramieri, E., Scolobig, A. und Sterk, M. (2022): Building climate resilience through nature-based solutions in Europe: A review of enabling knowledge, finance and governance frameworks. *Climate Risk Management* 37, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100450>.
- Calow, R. und Mason, N. (2014): The real water crisis: inequality in a fast-changing world. London: Overseas Development Institute (ODI). <https://cdn.odi.org/media/documents/8953.pdf>.
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S. und Zickfeld, K. (2021): Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks Supplementary Material. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 673–816. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.007>.
- Canas, N. (2024): Europäische Kommission legt Wasserstrategie auf Eis. Berlin: Euractiv. <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/europaeische-kommission-legt-wasserstrategie-auf-eis/>, erschienen am 17.02.2024.
- Cantelon, J. A., Guimond, J. A., Robinson, C. E., Michael, H. A. und Kurylyk, B. L. (2022): Vertical Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers Driven by Episodic Flooding: A Review. *Water Resources Research* 58 (11), e2022WR032614. <https://www.doi.org/10.1029/2022wr032614>.
- Capon, S. J., Chambers, L. E., Mac Nally, R., Naiman, R. J., Davies, P., Marshall, N., Pittock, J., Reid, M., Capon, T., Douglas, M., Catford, J., Baldwin, D. S., Stewardson, M., Roberts, J., Parsons, M. und Williams, S. E. (2013): Riparian Ecosystems in the 21st Century: Hotspots for Climate Change Adaptation? *Ecosystems* 16 (3), 359–381. <https://www.doi.org/10.1007/s10021-013-9656-1>.
- Capon, S. J., Stewart-Koster, B. und Bunn, S. E. (2021): Future of freshwater ecosystems in a 1.5 C warmer world. *Frontiers in Environmental Science* 9, 784642. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.784642>.
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. und Supratid, S. (2022): Water. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (Hrsg.): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 551–712. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.006>.
- Caruso, G. D. (2017): The legacy of natural disasters: The intergenerational impact of 100 years of disasters in Latin America. *Journal of Development Economics* 127, 209–233. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2017.03.007>.
- Casanova, M. T., Bachmann, M., Bagella, S., Bester, A., Lloyd, L. und Farnsworth, L. (2023): Just Add Water? Wetland and Riparian Restoration. In: Florentine, S., Gibson-Roy, P., Dixon, K. W. und Broadhurst, L. (Hrsg.): *Ecological Restoration*. Cham: Springer, 195–239. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3_6.
- Castañó, S., de la Losa, A., Martínez-Santos, P., Mediavilla, R. und Santisteban, J. I. (2018): Long-term effects of aquifer overdraft and recovery on groundwater quality in a Ramsar wetland: Las Tablas de Daimiel National Park, Spain. *Hydrological Processes* 32 (18), 2863–2873. <https://www.doi.org/10.1002/hyp.13225>.
- Castellar, J. A., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclus, H., Arias, C. A., Carvalho, P. N., Galvao, A. und Comas, J. (2022): Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities. *Journal of Cleaner Production* 340, 130660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130660>.
- Castillo-Zacarias, C., Barocio, M. E., Hidalgo-Vázquez, E., Sosa-Hernández, J. E., Parra-Arroyo, L., López-Pacheco, I. Y., Barceló, D., Iqbal, H. N. M. und Parra-Saldívar, R. (2021): Antidepressant drugs as emerging contaminants: Occurrence in urban and non-urban waters and analytical methods for their detection. *Science of The Total Environment* 757, 143722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143722>.
- Cauvy-Fraunie, S. und Dangles, O. (2019): A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution* 3 (12), 1675–1685. <https://www.doi.org/10.1038/s41559-019-1042-8>.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2023): *Water and Biodiversity: Relevance of water and water-related ecosystems to the Goals and Targets of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. Montreal: CBD. <https://www.cbd.int/sites/default/files/2023-03/gbf-water-implications-cbd-march2023.pdf>.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2024): *2030 Targets (with Guidance Notes)*. Montreal: CBD. <https://www.cbd.int/gbf/targets>, abgerufen am 4.06.2024.
- CBI – Climate Bonds Initiative (2024): *Global State of the Market 2023*. London: CBI. https://www.climatebonds.net/files/reports/cbi_sotm23_02e.pdf.
- CDC – Centers for Disease Control and Prevention (2024): *Harmful Algal Blooms: Contributing Factors and Impacts*. Druid Hills, USA: CDC. https://www.cdc.gov/harmful-algal-blooms/about/harmful-algal-blooms-contributing-factors-and-impacts.html?CDC_AAref_Val=https://www.cdc.gov/habs/environment.html, abgerufen am 8.07.2024.
- CDP – Carbon Disclosure Project (2021): *A Wave of Change: The role of companies in building a water-secure world*. CDP Global Water Report 2020. London: CDP.
- CDP – Carbon Disclosure Project und Planet Tracker (2022): *High and dry: How water issues are stranding assets*. London: CDP.
- Chakravarty, A. (2023): *Ensuring Water Security in the Brahmaputra basin: shift from conflict to cooperation*. In: Casado Pérez, V. und Larson, R. (Hrsg.): *A Research Agenda for Water Law*. Cheltenham: Edward Elgar, 33–58.
- Chaplin-Kramer, R., Sharp, R. P., Weil, C., Bennett, E. M., Pascual, U., Arkema, K. K., Brauman, K. A., Bryant, B. P., Guerry, A. D. und Haddad, N. M. (2019): Global modeling of nature's contributions to people. *Science* 366 (6462), 255–258. <https://doi.org/10.1126/science.aaw3372>.
- Chappelle, C., Collins, J. und Hanak, E. (2021): *Access to Safe Drinking Water in California*. San Francisco, Kalifornien: Public Policy Institute of California (PPIC).
- Chappelle, C. und Hanak, E. (2021): *Water Affordability in California*. San Francisco, Kalifornien: Public Policy Institute of California (PPIC).
- Chávez García Silva, R., Reinecke, R., Coptý, N. K., Barry, D. A., Heggy, E., Labat, D., Roggero, P. P., Borchardt, D., Rode, M., Gómez-Hernández, J. J. und Jomaa, S. (2024): Multi-decadal groundwater observations reveal surprisingly stable levels in southwestern Europe. *Communications Earth & Environment* 5 (1), 387. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01554-w>.
- Cheng, D., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., Wei, Q. und Wei, D. (2020): A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: Water pollution problems and control approaches. *Journal of Hazardous Materials* 387, 121682. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121682>.

- Chevalier, N., Guillou, P., Viguié, C., Fini, J.-B., Sachs, L. M., Michel-Caillet, C. und Mhaouty-Kodja, S. (2024): Lithium and endocrine disruption: A concern for human health? *Environment International*, 108861. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108861>.
- Chihanga, T. (2019): Social and behaviour change for sustainable WASH interventions in Zimbabwe. Loughborough: Loughborough University. <https://hdl.handle.net/2134/35650>.
- Chinkin, C. (2000): Normative Development in the International Legal System. In: Shelton, D. (Hrsg.): *Commitment and Compliance. The Role of Non-Binding Norms in the International Legal System*. Oxford: Oxford University Press, 21–42.
- Choi, H.-B., Ryu, J.-S., Shin, W.-J. und Vigier, N. (2019): The impact of anthropogenic inputs on lithium content in river and tap water. *Nature Communications* 10, 5371. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13376-y>.
- Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O. und Husain, T. (2016): Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of The Total Environment* 569–570, 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>.
- Christ, M. und Sommer, B. (2023): Weltrettungskompetenz? Überlegungen zu BNE aus der Perspektive der sozial-ökologischen Transformationsforschung. *Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik (ZEP)* 46 (2), 25–30. <https://doi.org/10.31244/zep.2023.02.0>.
- Christian, J. I., Basara, J. B., Hunt, E. D., Otkin, J. A., Furtado, J. C., Mishra, V., Xiao, X. und Randall, R. M. (2021): Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *Nature communications* 12, 6330. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>.
- Cid, N., Er-s, T., Heino, J., Singer, G., Jähnig, S. C., Cañedo-Argüelles, M., Bonada, N., Sarremejane, R., Mykrä, H., Sandin, L., Paloniemi, R., Varumo, L. und Detry, T. (2022): From meta-system theory to the sustainable management of rivers in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment* 20 (1), 49–57. <https://doi.org/10.1002/fee.2417>.
- Cissé, G., McLeman, R., Adams, H., Aldunce, P., Bowen, K., Campbell-Lendrum, D., Clayton, S., Ebi, K. L., Hess, J., Huang, C., Liu, Q., McGregor, G., Semenza, J. und Tirado, M. C. (2022): Health, Wellbeing and the Changing Structure of Communities. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (Hrsg.): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1041–1170.
- Civic, M. (1998): A comparative analysis of the Israeli and Arab water law traditions and insights for modern water sharing agreements. *Denver Journal of International Law and Policy* 26 (3), 437–452.
- civity Management Consultants (2018): *Kosten und verursachungsgerechte Finanzierung einer vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW).
- CNRA – California Natural Resources Agency (2022): *California's Water Supply Strategy: Adapting to a Hotter, Drier Future*. Sacramento, Kalifornien: CNRA. <https://resources.ca.gov/-/media/CNRA-Website/Files/Initiatives/Water-Resilience/CA-Water-Supply-Strategy.pdf>.
- CNRA – California Natural Resources Agency (2023): *California's Groundwater Conditions: Semi-Annual Update October 2023 Fall Bulletin*. Sacramento, Kalifornien: CNRA.
- Convergence – Global Network for Blended Finance (2024): *Blended Finance*. Toronto: Convergence. <https://www.convergence.finance/blended-finance>, abgerufen am 11.03.2024.
- Cooper, M. W., Brown, M. E., Hochrainer-Stigler, S., Pflug, G., McCallum, I., Fritz, S., Silva, J. und Zvoleff, A. (2019): Mapping the effects of drought on child stunting. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (35), 17219–17224. <https://doi.org/10.1073/pnas.190522811>.
- Cornwall, W. (2023): After the flood. *Science* 382 (6668), 254–259. <https://doi.org/10.1126/science.adl4035>.
- Costello, M. J., Vale, M. M., Kiessling, W., Maharaj, S., Price, J. und Talukdar, G. H. (2022): Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (Hrsg.): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2123–2161. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.018>.
- Cottier, T., Aerni, P., Karapinar, B., Matteotti, S., de Sépibus, J. und Shingal, A. (2014): The Principle of Common Concern and Climate Change. *Archiv des Völkerrechts* 52, 293–324. <https://www.doi.org/10.1628/000389214X14186502494027>.
- Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Glüge, J., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C. A., Scheringer, M. und Wang, Z. (2020): The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class. *Environmental Science: Processes & Impacts* 22 (12), 2307–2312. <https://www.doi.org/10.1039/D0EM00355G>.
- Crate, S. A. und Nuttall, M. (2009): *Anthropology and Climate Change: From Encounters to Actions*. New York: Routledge.
- Cremades, R., Sanchez-Plaza, A., Hewitt, R. J., Mitter, H., Baggio, J. A., Olazabal, M., Broekman, A., Kropf, B. und Tudose, N. C. (2021): Guiding cities under increased droughts: The limits to sustainable urban futures. *Ecological Economics* 189, 107140. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107140>.
- Cressey, D. (2017): Climate change is making algal blooms worse. *Nature*, 1–2. <https://www.doi.org/10.1038/nature.2017.21884>.
- Cui, T., Li, Y., Yang, L., Nan, Y., Li, K., Tudaji, M., Hu, H., Long, D., Shahid, M., Mubeen, A., He, Z., Yong, B., Lu, H., Li, C., Ni, G., Hu, C. und Tian, F. (2023): Non-monotonic changes in Asian Water Towers' streamflow at increasing warming levels. *Nature Communications* 14, 1176. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-023-36804-6>.
- Cullet, P. und Koonan, S. (2017) (Hrsg.): *Water Law in India: An Introduction to Legal Instruments*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Cushing, L. J., Ju, Y., Kulp, S., Depsky, N., Karasaki, S., Jaeger, J., Raval, A., Strauss, B. und Morello-Frosch, R. (2023): Toxic Tides and Environmental Injustice: Social Vulnerability to Sea Level Rise and Flooding of Hazardous Sites in Coastal California. *Environmental Science & Technology* 57 (19), 7370–7381. <https://www.doi.org/10.1021/acs.est.2c07481>.
- CWIS – Citywide Inclusive Sanitation Initiative, BMGF – The Bill & Melinda Gates Foundation und Athena Infonomics (2021): *Lusaka CWIS City Snapshot*. Washington D.C: CWIS.
- d'Odorico, P., Carr, J., Dalin, C., Dell'Angelo, J., Konar, M., Laio, F., Ridolfi, L., Rosa, L., Suweis, S. und Tamea, S. (2019): Global virtual water trade and the hydrological cycle: patterns, drivers, and socio-environmental impacts. *Environmental Research Letters* 14 (5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab05f4>.
- da Silva, J. P., Sousa, R., Goncalves, D. V., Miranda, R., Reis, J., Teixeira, A., Varandas, S., Lopes-Lima, M. und Filipe, A. F. (2023): Streams in the Mediterranean Region are not for mussels: Predicting extinctions and range contractions under future climate change. *Science of The Total Environment* 883, 163689. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163689>.
- Dakyaga, F., Ahmed, A. und Sillim, M. L. (2021): Governing ourselves for sustainability: Everyday ingenuities in the governance of water infrastructure in the informal settlements of Dar es Salaam. *Urban Forum* 32, 111–129. <https://doi.org/10.1007/s12132-020-09412-6>.

- Daly-Hassen, H., Annabi, M. und King-Okumu, C. (2019): Social and Private Profitability of Tree-Based Adaptation Options to Climate Change in a Dryland Area of Tunisia. *New Medit* 18 (2), 89–104. <https://www.doi.org/10.30682/nm1902f>.
- Damania, R. (2020): The economics of water scarcity and variability. *Oxford Review of Economic Policy* 36 (1), 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2017.10.003>.
- Dang, Q. und Konar, M. (2018): Trade openness and domestic water use. *Water Resources Research* 54 (1), 4–18. <https://doi.org/10.1002/2017WR021102>.
- Daniels, A. (2021): São Paulo in poverty: improving life in the slums. Bournemouth: BUZZ Bournemouth. <https://buzz.bournemouth.ac.uk/2021/01/nearly-20-of-residents-in-sao-paulo-live-in-poverty/>, erschienen am 21.01.2021.
- Danske Vandværker (2024): About us: The Association of Waterworks in Denmark. Solrød Strand: Danske Vandværker. <https://danskevv.dk/om-os/about-us/>, abgerufen am 5.03.2024.
- Das, S., Fuchs, H., Philip, R. und Rao, P. (2022): A review of water valuation metrics: Supporting sustainable water use in manufacturing. *Water Resources and Industry* 29, 100199. <https://www.doi.org/10.1016/j.wri.2022.100199>.
- Davenport, C. (2023): Strawberry Case Study: What if Farmers Had to Pay for Water? New York: New York Times. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/12/29/climate/california-farmers-water-tax.html>, erschienen am 22.01.2024.
- Davidson, N. C., van Dam, A. A., Finlayson, C. M. und McInnes, R. J. (2019): Worth of wetlands: revised global monetary values of coastal and inland wetland ecosystem services. *Marine and Freshwater Research* 70 (8), <https://www.doi.org/10.1071/mf18391>.
- Davies, I. (2017): Women's Economic Empowerment and Care (WE-Care)-Oxfam: Phase 2 Interim Report. Oxford: Oxfam.
- de Graaf, I. E., van Beek, R. L., Gleeson, T., Moosdorf, N., Schmitz, O., Sutanudjaja, E. H. und Bierkens, M. F. (2017): A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. *Advances in water Resources* 102, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.01.011>.
- de Ruyter van Steveninck, E., Arrieta, L., Lloyd, G., Ashipala, J., Gallo, I. und Fenni, Y. (2018): Climate Change Adaptation and Integrated Water Resources Management. Stockholm: International Capacity Development Network for Sustainable Water Management (Cap-Net). <https://www.doi.org/10.13140/RG.2.2.29264.66560>.
- De Stefano, L., Hernández-Mora, N., Gómez-Limón, J. und Calatrava, J. (2016): Los mercados informales de aguas en España: una visión de conjunto. In: Gómez-Limón, J. A. und Calatrava, J. (Hrsg.): Los mercados de agua en España: presente y perspectivas. Barcelona: Fundación Cajamar, 95–121.
- Dean, L., Njelesani, J., Smith, H. und Bates, I. (2015): Promoting sustainable research partnerships: a mixed-method evaluation of a United Kingdom-Africa capacity strengthening award scheme. *Health Research Policy and Systems* 13, 81. <https://www.doi.org/10.1186/s12961-015-0071-2>.
- Deane, B. M. D., Brian (2021): The Alliance of Community-Owned Water Services in Europe: Opportunities and Challenges Based on the Irish Perspective. *Water* 13 (22), 3181. <https://doi.org/10.3390/w13223181>.
- DeBerry, D. A. und Hunter, D. M. (2024): Impacts of Invasive Plants on Native Vegetation Communities in Wetland and Stream Mitigation. *Biology (Basel)* 13 (4), 275. <https://www.doi.org/10.3390/biology13040275>.
- Delevingne, L., Glazener, W., Grégoir, L. und Henderson, K. (2020): Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know. New York: McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-decarbonization-what-every-mining-ceo-needs-to-know/>, erschienen am 28.01.2020.
- Dellapenna, J. W. und Gupta, J. (2009) (Hrsg.): The evolution of the law and politics of water. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dellapenna, J. W., Gupta, J., Li, W. J. und Schmidt, F. (2013): Thinking about the Future of Global Water Governance. *Ecology and Society* 18 (3), 28. <https://www.doi.org/10.5751/Es-05657-180328>.
- Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X., Li, Z., Liu, J. und Zhu, D. (2021): Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research* 9 (3), 344–359. <https://www.doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002>.
- Deng, G., Gao, J., Jiang, H., Li, D., Wang, X., Wen, Y., Sheng, L. und He, C. (2022): Response of vegetation variation to climate change and human activities in semi-arid swamps. *Frontiers in Plant Science* 13, 990592. <https://www.doi.org/10.3389/fpls.2022.990592>.
- Depietri, Y. und McPhearson, T. (2017): Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction. In: Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J. und Bonn, A. (Hrsg.): Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice. Cham: Springer Nature, 91–109. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_6.
- DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft (2023): MAK- und BAT-Werte-Liste 2023. Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 59. Bonn: DFG. https://www.doi.org/10.34865/mbwl_2023_deu.
- DFI BCF – DFI Working Group on Blended Concessional Finance for Private Sector Projects (2023): Joint report, March 2023 Update. Washington, D.C.: International Finance Corporation (IFC).
- DG ENV – Directorate-General for Environment (2023): The Road to Green 5: Restoring European rivers - a win-win scenario for humans and nature. Brüssel: EU. https://environment.ec.europa.eu/news/restoring-european-rivers-win-win-scenario-humans-and-nature-2023-10-18_en, erschienen am 18.10.2023.
- DGE – Deutsche Gesellschaft für Ernährung (2024): Gut essen und trinken – die DGE-Empfehlungen. Bonn: DGE. <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/gut-essen-und-trinken/dge-empfehlungen/>, abgerufen am 12.07.2024.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., Brauman, K. A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P. W., van Oudenhoven, A. P. E., van der Plaaf, F., Schröter, M., Lavorel, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., Bukvareva, E., Davies, K., Demissew, S., Erpul, G., Failler, P., Guerra, C. A., Hewitt, C. L., Keune, H., Lindley, S. und Shirayama, Y. (2018): Assessing nature's contributions to people. *Science* 359 (6373), 270–272. <https://www.doi.org/10.1126/science.aap8826>.
- Di Marco, A. (2023): Water democracy under European Union law: Requiring participatory services management. *Utilities Policy* 84, 101648. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101648>.
- DIN – Deutsches Institut für Normung (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie (DIN 4049-3). DIN: Berlin. <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naw/wdc-beuth:din21:2387598>, abgerufen am 20.11.2024.
- Distefano, T. und Kelly, S. (2017): Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. *Ecological Economics* 142, 130–147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.019>.
- Distefano, T., Laio, F., Ridolfi, L. und Schiavo, S. (2018): Shock transmission in the international food trade network. *PloS one* 13 (8), e0200639. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200639>.
- Ditlevsen, P. und Ditlevsen, S. (2023): Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications* 14, 4254. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- Dixon-Decleve, S., Gaffney, O., Ghosh, J., Randers, J., Rockstrom, J. und Stoknes, P. E. (2022): Earth for All: A Survival Guide for Humanity. Gabriola Island, Kanada: New Society Publishers.
- Dombrowsky, I., Hagemann, N. und Houdret, A. (2014): The river basin as a new scale for water governance in transition countries? A comparative study of Mongolia and Ukraine. *Environmental Earth Sciences* 72, 4705–4726. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3308-4>.

- Dombrowsky, I., Hägele, R., Behrenbeck, L., Bollwein, T., Köder, M., Oberhauser, D., Schamberger, R., Al-Naber, M., Al-Raggad, M. und Salameh, E. (2022a): Natural resource governance in light of the 2030 agenda: The case of competition for groundwater in Azraq, Jordan (IDOS Studies 106). Bonn: German Institute of Development and Sustainability (IDOS). <https://doi.org/10.23661/is106.2022>.
- Dombrowsky, I., Lenschow, A., Meergans, F., Schütze, N., Lukat, E., Stein, U. und Yousefi, A. (2022b): Effects of policy and functional (in)coherence on coordination – A comparative analysis of cross-sectoral water management problems. *Environmental Science & Policy* 131, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.019>.
- Dörendahl, E. und Aich, P. (2021): Integrating EbA und IWRM for climate-resilient water management. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., Bianchi, A., Mongelli, I., Frieler, K., Betts, R. A. und Feyen, L. (2018): Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change* 8(9), 781–786. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam Mba, W., Rosenfeld, D., Tierney, J. und Zolin, O. (2021): Water Cycle Changes. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1055–1210. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.010>.
- Doyle, M. W., Stanley, E. H., Orr, C. H., Selle, A. R., Sethi, S. A. und Harbor, J. M. (2005): Stream ecosystem response to small dam removal: Lessons from the Heartland. *Geomorphology* 71(1), 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.04.011>.
- Drewes, J. (2024): Projekt Nutzwasser – Nutzwasser als alternative Wasserressource. Garching/München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft. <https://www.nutzwasser.org/>, abgerufen am 17.09.2024.
- Drewes, J. E. und Horstmeyer, N. (2016): Recent Developments in Potable Water Reuse. In: Fatta-Kassinos, D., Dionysiou, D. D. und Kümmerer, K. (Hrsg.): *Advanced Treatment Technologies for Urban Wastewater Reuse*. Cham: Springer International Publishing, 269–290. https://doi.org/10.1007/978-94-007-698-2015_341.
- Droste, N., Schröter-Schlaack, C., Hansjürgens, B. und Zimmermann, H. (2017): Implementing nature-based solutions in urban areas: financing and governance aspects. In: Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J. und Bonn, A. (Hrsg.): *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: linkages between science, policy and practice*. Cham: Springer Nature, 307–321.
- Duarte, B., Gameiro, C., Matos, A. R., Figueiredo, A., Silva, M. S., Cordeiro, C., Caçador, I., Reis-Santos, P., Fonseca, V. und Cabrita, M. T. (2021): First screening of biocides, persistent organic pollutants, pharmaceutical and personal care products in Antarctic phytoplankton from Deception Island by FT-ICR-MS. *Chemosphere* 274, 129860. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129860>.
- DuChanois, R. M., Cooper, N. J., Lee, B., Patel, S. K., Mazurowski, L., Graedel, T. E. und Elimelech, M. (2023): Prospects of metal recovery from wastewater and brine. *Nature Water* 1, 37–46. <https://www.doi.org/10.1038/s44221-022-00006-z>.
- Duda, J. J. und Bellmore, J. R. (2022): Dam Removal and River Restoration. In: Mehner, T. und Tockner, K. (Hrsg.): *Encyclopedia of Inland Waters* (Second Edition). Oxford: Elsevier, 576–585. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128191668001018>.
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z., Knowler, D. J., Leveque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A. H., Soto, D., Stiassny, M. L. und Sullivan, C. A. (2006): Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 81(2), 163–182. <https://www.doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Dudgeon, D. (2019): Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Curr Biol* 29(19), R960–R967. <https://www.doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.002>.
- Duffus, J. H. (2022): „Heavy metals“ a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 74(5), 793–807. <https://www.doi.org/10.1351/pac200274050793>.
- DUK – Deutsche UNESCO Kommission (2024): Gleichberechtigte Wissenschaftskooperation weltweit – Positionspapier der Deutschen UNESCO-Kommission. Bonn: Deutsche UNESCO-Kommission e. V.
- Duong, K. und Saphores, J.-D. M. (2015): Obstacles to wastewater reuse: an overview. *WIREs Water* 2(3), 199–214. <https://doi.org/10.1002/wat2.1074>.
- Dupuy, J.-I., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J. und Fernandes, P. (2020): Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science* 77(2), 35. <https://www.doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5>.
- Durner, W. und Ludwig, R. (2008): Paradigmenwechsel in der europäischen Umweltrechtsetzung? Überlegungen zu Bedeutung und Grundstrukturen des Instruments der Maßnahmenplanung im neueren Umweltrecht der Gemeinschaft. *Natur und Recht* 30, 457–467. <https://doi.org/10.1007/s10357-008-1496-y>.
- Durner, W. (2019): Das „Verschlechterungsverbot“ und das „Verbesserungsgebot“ im Wasserwirtschaftsrecht. *Natur und Recht* 41(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10357-018-3458-3>.
- Durner, W. (2021): Infrastrukturverwaltung. In: Kahl, W. und Ludwigs, M. (Hrsg.): *Handbuch des Verwaltungsrechts Band I Grundstrukturen des deutschen Verwaltungsrechts*. München: C.F. Müller, 807–846.
- Dusaucy, J., Gateuille, D., Perrette, Y. und Naffrechoux, E. (2021): Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution* 284, 117075. <https://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117075>.
- Dutta, D., Arya, S. und Kumar, S. (2021): Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. *Chemosphere* 285, 131245. <https://www.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>.
- DWD – Deutsche Wetterdienst (2024): Wetter- und Klimalexikon: Kryosphäre. Offenbach: DWD. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101508&lv2=101334>, abgerufen am 20.11.2024.
- DWR – California Department of Water Resources (2023): DWR Captures and Stores Water from Record-Breaking Snowpack. Sacramento, California: DWR. https://water.ca.gov/News/Blog/2023/July-23/DWR-Captures-and-Stores-Water-from-Record-Breaking-Snowpack?utm_medium=email&utm_source=govdelivery, erschienen am 19.07.2023.
- Eales, J., Bethel, A., Galloway, T., Hopkinson, P., Morrissey, K., Short, R. E. und Garside, R. (2022): Human health impacts of exposure to phthalate plasticizers: An overview of reviews. *Environment International* 158, 106903. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106903>.
- ECB – European Central Bank (2021): Climate-related risk and financial stability. Frankfurt am Main: ECB. <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/ecb.climatefinancialstability202107-87822fae81.en.pdf>.
- ECB – European Central Bank (2022): Walking the talk – Banks gearing up to manage risks from climate change and environmental degradation: Results of the 2022 thematic review on climate-related and environmental risks. Frankfurt am Main: ECB.
- Edegbene, A. O. und Akamagwuna, F. C. (2022): Insights from the Niger Delta Region, Nigeria on the impacts of urban pollution on the functional organisation of Afrotropical macroinvertebrates. *Scientific Reports* 12(1), 22551. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26659-0>.

- EEA – European Environment Agency (2015): Proportion of classified water bodies in different RBDs affected by pollution pressures, for rivers and lakes. Kopenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/proportion-of-classified-water-bodies-4>, erschienen am 16.06.2015.
- EEA – European Environment Agency (2021): Ecological status of surface waters in Europe. Kopenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/ecological-status-of-surface-waters?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b>, erschienen am 18.11.2021.
- EEA – European Environment Agency (2022): Beyond water quality — Sewage treatment in a circular economy. Kopenhagen: EEA. <https://www.doi.org/10.2800/897113>.
- EEA – European Environment Agency (2023): Economic losses from weather- and climate-related extremes in Europe. Kopenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related>, erschienen am 6.10.2023.
- EEA – European Environment Agency (2024a): Climate-ADAPT: Conducting a cost-benefit analysis of adaptation measures. Kopenhagen: EEA. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/tools/urban-ast/step-4-2>, erschienen am 7.07.2016.
- EEA – European Environment Agency (2024b): Water glossary. Kopenhagen: EEA. <https://www.eea.europa.eu/themes/water/glossary>, abgerufen am 20.11.2024.
- EESC – European Economic and Social Committee (2023): Declaration for an EU Blue Deal. Brüssel: EESC. <https://www.eesc.europa.eu/de/initiatives/eu-blue-deal>.
- EFRAG – European Financial Reporting Advisory Group (2022): Draft European Sustainability Reporting Standards, Appendix IV – TCFD Recommendations and ESRS Reconciliation Table. Brüssel: EFRAG.
- EFSA – European Food Safety Authority, Carrasco Cabrera, L., Di Piazza, G., Dujardin, B., Marchese, E. und Medina Pastor, P. (2024): The 2022 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal* 22 (4), e8753. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8753>.
- EIB – Europäische Investitionsbank (2023a): Investing in nature-based solutions – State-of-play and way forward for public and private financial measures in Europe. Luxemburg: EIB.
- EIB – Europäische Investitionsbank (2023b): Orientierung der EIB für Finanzierungen im Wassersektor, Aufbau klimaresilienter Wassersysteme. Luxemburg: EIB.
- Elevitch, C. R., Mazaroli, D. N. und Ragone, D. (2018): Agroforestry Standards for Regenerative Agriculture. *Sustainability* 10 (9), <https://www.doi.org/10.3390/su10093337>.
- Elliott, J., Deryng, D., Muller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Florke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Satoh, Y., Schmid, E., Stacke, T., Tang, Q. und Wisser, D. (2014): Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (9), 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>.
- Emmons, C. V. (2020): International Organizations: Enablers or Impediments for Authoritarian International Law? *AJIL Unbound* 114, 226–231. <https://www.doi.org/10.1017/aju.2020.45>.
- Engel, J., Kokas, D., Lopez-Acevedo, G. und Maliszewska, M. (2021): The distributional impacts of trade: Empirical innovations, analytical tools, and policy responses. Washington, D.C.: World Bank Group.
- EPA – United States Environmental Protection Agency (2023): Technical Fact Sheet: Lithium in Drinking Water. Washington, D.C.: EPA. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-11/ucmr5-technical-fact-sheet-lithium-in-drinking-water.pdf>.
- EPA – United States Environmental Protection Agency (2024): Frequent Questions about Water Quality Trading. Washington, D.C.: EPA. <https://www.epa.gov/npdes/frequent-questions-about-water-quality-trading>, abgerufen am 15.07.2024.
- Eriksen, S., Schipper, E. L. F., Scoville-Simonds, M., Vincent, K., Adam, H. N., Brooks, N., Harding, B., Khatri, D., Lenaerts, L., Liverman, D., Mills-Novoa, M., Mosberg, M., Movik, S., Muok, B., Nightingale, A., Ojha, H., Sygna, L., Taylor, M., Vogel, C. und West, J. J. (2021): Adaptation interventions and their effect on vulnerability in developing countries: Help, hindrance or irrelevance? *World Development* 141, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105383>.
- Erwin, A., Ma, Z., Popovici, R., Salas O'Brien, E. P., Zanotti, L., Zeballos Zeballos, E., Bauchet, J., Ramirez Calderón, N. und Arce Larrea, G. R. (2021): Intersectionality shapes adaptation to social-ecological change. *World Development* 138, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105282>.
- Escher, B., Neale, P. und Leusch, F. (2021): Bioanalytical tools in water quality assessment. London: IWA Publishing.
- Escher, B. I., Altenburger, R., Blüher, M., Colbourne, J. K., Ebinghaus, R., Fantke, P., Hein, M., Kock, W., Kummerer, K., Leipold, S., Li, X., Scheringer, M., Scholz, S., Schloter, M., Schweizer, P. J., Tal, T., Tetko, I., Traidl-Hoffmann, C., Wick, L. Y. und Fenner, K. (2023): Modernizing persistence-bioaccumulation-toxicity (PBT) assessment with high throughput animal-free methods. *Archives of Toxicology* 97 (5), 1267–1283. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03485-5>.
- Escriba-Bou, A., Medellín-Azuara, J., Hanak, E., Abatzoglou, J. und Viers, J. (2022a): Drought and California's Agriculture. San Francisco, Kalifornien: Public Policy Institute of California (PPIC).
- Escriba-Bou, A., Rosser, A. und Hanak, E. (2022b): How Are California's Cities Managing the Drought? San Francisco, Kalifornien: Public Policy Institute of California (PPIC). <https://www.ppic.org/blog/how-are-californias-cities-managing-the-drought/>, erschienen am 31.10.2022.
- Etongo, D., Djenontin, I., Kanninen, M. und Fobissie, K. (2015): Smallholders' Tree Planting Activity in the Ziro Province, Southern Burkina Faso: Impacts on Livelihood and Policy Implications. *Forests* 6 (12), 2655–2677. <https://www.doi.org/10.3390/f6082655>.
- EU – Europäische Union (2020): Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 198 vom 22.06.2020. Brüssel: EU.
- EU – Europäische Union (2023): Verordnung (EU) 2023/2859 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2023 zur Einrichtung eines zentralen europäischen Zugangsportals für den zentralisierten Zugriff auf öffentlich verfügbare, für Finanzdienstleistungen, Kapitalmärkte und Nachhaltigkeit relevante Informationen. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 2859 vom 20.12.2023. Brüssel: EU.
- EU Blue Economy Observatory (2024): Desalination. Brüssel: EU. https://blue-economy-observatory.ec.europa.eu/eu-blue-economy-sectors/desalination_en#6, abgerufen am 8.07.2024.
- EuGH – Europäischer Gerichtshof (2015): Urteil des Gerichtshofs (Große Kammer) vom 1. Juli 2015 in der Rechtssache C-416/13 (Weservertiefung). Luxemburg: EuGH.
- EuGH – Europäischer Gerichtshof (2020): Urteil des Gerichtshofs (Erste Kammer) vom 28. Mai 2020 in der Rechtssache C-535/18. Luxemburg: EuGH.
- Europäische Kommission (2016): 10 benefits of Economic Partnership Agreements (EPAs). Brüssel: EU.
- Europäische Kommission (2018): Aktionsplan: Finanzierung nachhaltigen Wachstums. COM(2018) 97 final. Brüssel: EU.
- Europäische Kommission (2020a): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. COM(2020) 98 final. Brüssel: EU.
- Europäische Kommission (2020b): Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study. Brüssel: EU. <https://www.doi.org/10.2873/865242>.

- Europäische Kommission (2021a): Strategy for Financing the Transition to a Sustainable Economy. COM(2021) 390 final. Brüssel: EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0390>.
- Europäische Kommission (2021b): Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament über die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG), der Richtlinie über Umweltqualitätsnormen (2008/105/EG, geändert durch die Richtlinie 2013/39/EU) und der Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG). COM(2021) 970 final. Brüssel: EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0970>.
- Europäische Kommission (2023a): EU Aid for Trade Progress Report 2023. Brüssel: EU. <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2024/04/eu-aid-for-trade-MN0323474ENN.pdf>.
- Europäische Kommission (2023b): Delegierte Verordnung (EU) 2023/2486 der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien, anhand deren bestimmt wird, unter welchen Bedingungen davon auszugehen ist, dass eine Wirtschaftstätigkeit einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz von Wasser- und Meeresressourcen, zum Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung oder zum Schutz und zur Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme leistet, und anhand deren bestimmt wird, ob diese Wirtschaftstätigkeit erhebliche Beeinträchtigungen eines der übrigen Umweltziele vermeidet, und zur Änderung der Delegierten Verordnung (EU) 2021/2178 der Kommission in Bezug auf besondere Offenlegungspflichten für diese Wirtschaftstätigkeiten. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 198/13 vom 21.11.2023. Brüssel: EU. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302486.
- Europäische Kommission (2024a): Mitteilung der Kommission. Leitkriterien und Grundsätze für das Konzept der wesentlichen Verwendung in EU-Rechtsvorschriften, die Chemikalien betreffen. C/2024/2894. Brüssel: EU. <https://eur-lex.europa.eu/eli/C/2024/2894/oj>.
- Europäische Kommission (2024b): Supporting companies in applying the European Sustainability Reporting Standards. Dokumentation eines Expertendialogs am 16. Mai 2024. Brüssel: EU. https://finance.ec.europa.eu/events/supporting-companies-applying-european-sustainability-reporting-standards-2024-05-16_en, abgerufen am 7.06.2024.
- Europäischer Rat (2024): Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Brüssel: EU.
- Europäisches Parlament und Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (2023): Draft Report on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115 (COM(2022)0305 – C9-0207/2022 – 2022/0196(COD)). Brüssel: EU.
- Europäisches Parlament (2024a): Initiative for water resilience in “A European Green Deal”. Brüssel: EU. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-water-resilience>.
- Europäisches Parlament (2024b): Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 10.4.2024 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung) (COM(2022)0541 – C9-0363/2022 – 2022/0345(COD)), P9_TA(2024)0222. Brüssel: EU. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0222_EN.pdf.
- EuroStat – Statistisches Amt der Europäischen Union (2023): Environmental tax statistics. Luxemburg: EuroStat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Environmental_tax_statistics#Environmental_taxes_in_the_EU, erschienen am 26.09.2023.
- Eyl-Mazzega, M.-A. und Cassignol, É. (2022): The Geopolitics of Seawater Desalination. Paris: Institut français des relations internationales (IFRI).
- Fahimi, A., Ducoli, S., Federici, S., Ye, G., Mousa, E., Frontera, P. und Bontempi, E. (2022): Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint. *Journal of Cleaner Production* 338, 130493. <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130493>.
- Falkenmark, M. und Rockström, J. (2004): *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. London, Sterling: Earthscan.
- Falkenmark, M. und Rockström, J. (2006): The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 132 (3), 129–132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129)).
- Falkenmark, M., Wang-Erlandsson, L. und Rockström, J. (2019): Understanding of water resilience in the Anthropocene. *Journal of Hydrology X* 2, 100009. <https://www.doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100009>.
- FAO – Food and Agriculture Organization und IWMI – International Water Management Institute (2018): *More people, more food, worse water? a global review of water pollution from agriculture*. Rom: FAO, IWMI.
- FAO – Food and Agriculture Organization und UNDP – United Nations Development Programm (2018): *Cost-benefit analysis for climate change adaptation policies and investments in the agriculture sectors*. Rom, New York: FAO, UNDP.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2019): *Proactive Approaches to Drought Preparedness: Where are we now and where do we go from here*. White Paper Proactive Approaches to Drought Preparedness. Rom: FAO. <http://www.fao.org/3/ca5794en/ca5794en.pdf>.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2020a): *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2020b): *Unpacking water tenure for improved food security and sustainable development*. Land and Water Discussion Papers. Rom: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1230en>.
- FAO – Food and Agriculture Organization, IUCN – International Union for Conservation of Nature und SER – Society for Ecological Restoration (2021): *Principles for Ecosystem Restoration to Guide the United Nations Decade 2021–2030*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organization und UN Water – United Nations Water (2021): *Progress on Level of Water Stress – 2021 Update*. Global Status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2. Rom: FAO, UN Water. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2022a): *Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests in the Context of National Food Security*. Rom: FAO. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/416990/>.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2022b): *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. Main report. Rom: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2024a): *Soil Conservation / World Overview of Conservation Approaches and Techniques (WOCAT)*. Rom: FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/soil-conservation/en/>, abgerufen am 1.07.2024.
- FAO – Food and Agriculture Organization (2024b): *Global Dialogue on Water Tenure*. Rom: FAO. <https://sdgs.un.org/partnerships/global-dialogue-water-tenure>, abgerufen am 25.06.2024.
- Farmer, M., Benson, A., McMahon, G., Principe, J. und Middleton, M. (2015): *Unintended Consequences of Involving Stakeholders Too Late: Case Study in Multi-Objective Management*. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141 (10), 1–8. [https://www.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000512](https://www.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000512).

- Faunt, C. C., Sneed, M., Traum, J. und Brandt, J. T. (2016): Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal* 24 (3), 675–684. <https://www.doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>.
- Faysse, N. (2015): The rationale of the Green Morocco Plan: missing links between goals and implementation. *The Journal of North African Studies* 20 (4), 622–634. <https://www.doi.org/10.1080/13629387.2015.1053112>.
- Fearnside, P. M. (2021): Lessons from Brazil's São Paulo droughts (commentary). Menlo Park, USA: Mongabay. <https://news.mongabay.com/2021/07/lessons-from-brazils-sao-paulo-droughts-commentary/>, erschienen am 30.07.2021.
- Filho, W. L., Wolf, F., Totin, E., Zvobgo, L., Simpson, N. P., Musiyiwa, K., Kalangu, J. W., Sanni, M., Adelekan, I., Efitre, J., Donkor, F. K., Balogun, A. L., Mucova, S. A. R. und Ayal, D. Y. (2023): Is indigenous knowledge serving climate adaptation? Evidence from various African regions. *Development Policy Review* 41 (2), e12664. <https://doi.org/10.1111/dpr.12664>.
- Finck Stiftung (2024a): Projekte & Partner: Praktische Beispiele für unsere Arbeit. Briesen (Mark): Finck Stiftung. <https://finck-stiftung.org/projekte-partner/>, abgerufen am 1.07.2024.
- Finck Stiftung (2024b): Das Reallabor für regenerative ökologische Landnutzung. Briesen (Mark): Finck Stiftung. <https://finck-stiftung.org/>, abgerufen am 1.07.2024.
- Finkelman, R. B., Wolfe, A. und Hendryx, M. S. (2021): The future environmental and health impacts of coal. *Energy Geoscience* 2, 99–112. <https://www.doi.org/10.1016/j.engeos.2020.11.001>.
- Finlayson, C. M. (2016): Freshwater Marshes and Swamps. In: Finlayson, C., Milton, G., Prentice, R. und Davidson, N. (Hrsg.): *The Wetland Book*. Dordrecht: Springer, 1–14.
- Finogenova, N., Dolganova, I., Berger, M., Núñez, M., Blizniukova, D., Müller-Frank, A. und Finkbeiner, M. (2019): Water footprint of German agricultural imports: Local impacts due to global trade flows in a fifteen-year perspective. *Science of the Total Environment* 662, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.264>.
- Fleischmann, N. und Dworak, T. (2022): Abschlussbericht: Evaluierung Dialogprozess „Nationaler Wasserdiallog“ (2018 – 2020). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/evaluierung-dialogprozess-nationaler-wasserdiallog>.
- Fleming, A., Agrawal, S., Dinomika, Fransisca, Y., Graham, L., Lestari, S., Mendham, D., O'Connell, D., Paul, B., Po, M., Rawluk, A., Sakuntaladewi, N., Winarno, B. und Yuwati, T. W. (2021): Reflections on integrated research from community engagement in peatland restoration. *Humanities and Social Sciences Communications* 8 (1), 199. <https://www.doi.org/10.1057/s41599-021-00878-8>.
- Flörke, M., Schneider, C. und McDonald, R. I. (2018): Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability* 1, 51–58. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>.
- Flörke, M., Onigkeit, J. und Oppel, H. (2021): Water Resources as important factors in the Energy Transition at local and global scale. Final Report of the joint project WANDEL. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.
- Foley, M. M., Bellmore, J. R., O'Connor, J. E., Duda, J. J., East, A. E., Grant, G. E., Anderson, C. W., Bountry, J. A., Collins, M. J., Connolly, P. J., Craig, L. S., Evans, J. E., Greene, S. L., Magilligan, F. J., Magirl, C. S., Major, J. J., Pess, G. R., Randle, T. J., Shafroth, P. B., Torgersen, C. E., Tullos, D. und Wilcox, A. C. (2017): Dam removal: Listening in. *Water Resources Research* 53 (7), 5229–5246. <https://doi.org/10.1002/2017WR020457>.
- Fowler, H. J., Wasko, C. und Prein, A. F. (2021): Intensification of short-duration rainfall extremes and implications for flood risk: current state of the art and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 379 (2195), 20190541. <https://www.doi.org/10.1098/rsta.2019.0541>.
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A. und Yu, Y. (2021): Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1211–1362. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
- Foyle, L., Burnett, M., Creaser, A., Hens, R., Keough, J., Madin, L., Price, R., Smith, H., Stone, S. und Kinobe, R. T. (2023): Prevalence and distribution of antimicrobial resistance in effluent wastewater from animal slaughter facilities: A systematic review. *Environmental Pollution* 318, 120848. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120848>.
- Freyburg, T. (2012): The two sides of functional cooperation with authoritarian regimes: a multi-level perspective on the conflict of objectives between political stability and democratic change. *Democratization* 19 (3), 575–601. <https://doi.org/10.1080/13510347.2012.674363>.
- Frimpong, F., Asante, M. D., Peprah, C. O., Amankwaa-Yeboah, P., Danquah, E. O., Ribeiro, P. F., Aidoo, A. K., Agyeman, K., Asante, M. O. O., Keteku, A. und Botey, H. M. (2023): Water-smart farming: review of strategies, technologies, and practices for sustainable agricultural water management in a changing climate in West Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7, 1110179. <https://www.doi.org/10.3389/fsufs.2023.1110179>.
- Fröhlich, C., Gioli, G., Cremades, R. und Myrntinen, H. (2018) (Hrsg.): *Water Security Across the Gender Divide*. Cham: Springer.
- Fu, Z., Ciais, P., Wigneron, J.-P., Gentile, P., Feldman, A. F., Makowski, D., Viovy, N., Kemanian, A. R., Goll, D. S., Stoy, P. C., Prentice, I. C., Yakir, D., Liu, L., Ma, H., Li, X., Huang, Y., Yu, K., Zhu, P., Li, X., Zhu, Z., Lian, J. und Smith, W. K. (2024): Global critical soil moisture thresholds of plant water stress. *Nature Communications* 15 (1), 4826. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49244-7>.
- Fuente, D., Allaire, M., Jeuland, M. und Whittington, D. (2020): Forecasts of mortality and economic losses from poor water and sanitation in sub-Saharan Africa. *PLoS one* 15 (3), e0227611. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227611>.
- Fukuyama, T. und Tajiki-Nishino, R. (2020): Pesticide and Immunotoxicology. In: Otsuki, T., Di Gioacchino, M. und Petrarca, C. (Hrsg.): *Allergy and Immunotoxicology in Occupational Health - The Next Step*. Singapore: Springer Singapore, 183–195. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4735-5_12.
- G7 – Gruppe der Sieben (2024): G7 Water Coalition. Savellietri: G7.
- G20 Water Platform (2024): Water Dialogue. <https://g20waterplatform.org.sa/en/Researches/Pages/WaterDialogue.aspx>, abgerufen am 3.07.2024.
- Gallardo-Albarrán, D. (2020): Sanitary infrastructures and the decline of mortality in Germany, 1877–1913. *The Economic History Review* 73 (3), 730–757. <https://doi.org/10.1111/ehr.12942>.
- Galloway, D., Jones, D. R. und Ingebritsen, S. (1999): *Land Subsidence in the United States*. Reston, Virginia: Geological Survey (USGS).
- Gambrill, M., Gilsdorf, R. J. und Kotwal, N. (2020): Citywide inclusive sanitation – business as unusual: shifting the paradigm by shifting minds. *Frontiers in Environmental Science* 7, 201. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00201>.
- Gangemi, S., Gofita, E., Costa, C., Teodoro, M., Briguglio, G., Nikitovic, D., Tzanakakis, G., Tsatsakis, A. M., Wilks, M. F., Spandidos, D. A. und Fenga, C. (2016): Occupational and environmental exposure to pesticides and cytokine pathways in chronic diseases (Review). *International Journal of Molecular Medicine* 38 (4), 1012–1020. <https://www.doi.org/10.3892/ijmm.2016.2728>.

- Gatis, N., Benaud, P., Anderson, K., Ashe, J., Grand-Clement, E., Luscombe, D. J., Puttock, A. und Brazier, R. E. (2023): Peatland restoration increases water storage and attenuates downstream stormflow but does not guarantee an immediate reversal of long-term ecohydrological degradation. *Scientific Reports* 13 (1), 15865. <https://www.doi.org/10.1038/s41598-023-40285-4>.
- GCA – Global Commission on Adaptation (2019): *Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience*. Rotterdam, Washington, D.C.: Global Center on Adaptation, World Resources Institute (WRI).
- GCEW – Global Commission on the Economics of Water (2023a): *The What, Why and How of the World Water Crisis: Global Commission on the Economics of Water – Phase 1 Review and Finding*. Paris: GCEW.
- GCEW – Global Commission on the Economics of Water (2023b): *Turning the Tide – A Call to Collective Action*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Geertsma, R., Wilschut, L. I. und Kauffman, J. H. (2009): *Baseline Review of the Upper Tana, Kenya. Green Water Credits Report 8*. Wageningen: World Soil Information (ISRIC).
- Gerenday, S., Perrone, D., Clark, J. und Ulibarri, N. (2023): Recycled water could recharge aquifers in the Central Valley. *California Agriculture*, 1–10. <https://www.doi.org/10.3733/ca.2023a0005>.
- Gerlitz, J.-Y., Apablaza, M., Hoermann, B., Hunzai, K. und Bennett, L. (2015): A Multidimensional Poverty Measure for the Hindu Kush–Himalayas, Applied to Selected Districts in Nepal. *Mountain Research and Development* 35 (3), 278–288. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00027.1>.
- Gerten, D. (2018): *Wasser: Knappheit, Klimawandel, Welt-ernährung*. München: C.H. Beck.
- Gething, P. W., Ayling, S., Mugabi, J., Muximpua, O. D., Kagulura, S. S. und Joseph, G. (2023): Cholera risk in Lusaka: A geospatial analysis to inform improved water and sanitation provision. *PLOS Water* 2 (8), e0000163. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000163>.
- Getirana, A., Libonati, R. und Cataldi, M. (2021): Brazil is in water crisis - it needs a drought plan. *Nature* 600, 218–220. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w>.
- Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M. und Tittonell, P. (2009): Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research* 114 (1), 23–34. <https://www.doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>.
- Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A. und Sumberg, J. (2021): Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture* 50 (1), 13–25. <https://www.doi.org/10.1177/0030727021998063>.
- Gitbo, T., Di Corato, L. und Hoffmann, R. (2021): Investing in climate change adaptation and mitigation: A methodological review of real-options studies. *Ambio* 50 (1), 229–241. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01342-8>.
- Ginzky, H. (2009): Die Pflicht zur Minderung von Schadstoffeinträgen in Oberflächengewässer – Vorgaben der Wasser-rahmenrichtlinie und der Richtlinie Prioritäre Stoffe. *Zeitschrift für Umweltrecht* 5, 242–249.
- Girard, C., Pulido-Velazquez, M., Rinaudo, J.-D., Pagé, C. und Caballero, Y. (2015): Integrating top-down and bottom-up approaches to design global change adaptation at the river basin scale. *Global Environmental Change* 34, 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.07.002>.
- Giupponi, C. und Gain, A. K. (2017): Integrated water resources management (IWRM) for climate change adaptation. *Regional Environmental Change* 17 (7), 1865–1867. <https://www.doi.org/10.1007/s10113-017-1173-x>.
- Gladstone, F., Liverman, D., Rodríguez, R. A. S. und Santos, A. E. M. (2021): NAFTA and environment after 25 years: A retrospective analysis of the US-Mexico border. *Environmental Science & Policy* 119, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.10.017>.
- Gleick, P. H. (2014): Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society* 6 (3), 331–340. <https://www.doi.org/10.1175/wcas-d-13-00059.1>.
- Glibert, P. M. (2020): Harmful algae at the complex nexus of eutrophication and climate change. *Harmful Algae* 91, 101583. <https://www.doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.001>.
- Goldstein, J. E., Neimark, B., Garvey, B. und Phelps, J. (2023): Unlocking „lock-in“ and path dependency: A review across disciplines and socio-environmental contexts. *World Development* 161, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.106116>.
- Gomes, I. B., Maillard, J.-Y., Simões, L. C. und Simões, M. (2020): Emerging contaminants affect the microbiome of water systems – strategies for their mitigation. *npj Clean Water* 3 (39), 1–11. <https://www.doi.org/10.1038/s41545-020-00086-y>.
- González-Gaya, B., Lopez-Herguedas, N., Bilbao, D., Mijangos, L., Iker, A. M., Etxebarria, N., Irazola, M., Prieto, A., Olivares, M. und Zuloaga, O. (2021): Suspect and non-target screening: the last frontier in environmental analysis. *Analytical Methods* 13 (16), 1876–1904. <https://www.doi.org/10.1039/D1AY00111F>.
- Gouel, C. und Laborde, D. (2021): The crucial role of domestic and international market-mediated adaptation to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management* 106, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2020.102408>.
- Gozzo, L. F., Drumond, A., Pampuch, L. A., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Reboita, M. S., Bier, A. A., Carpenedo, C. B., Bueno, P. G., Pinheiro, H. R., Custodio, M. d. S., Kuki, C. A. C., Tomaziello, A. C. N., Gomes, H. B., da Rocha, R. P., Coelho, C. A. S. und Pimentel, R. d. M. (2022): Intraseasonal Drivers of the 2018 Drought Over São Paulo, Brazil. *Frontiers in Climate* 4, 1–19. <https://www.doi.org/10.3389/fclim.2022.852824>.
- Grafton, R., Manero, A., Chu, L. und Wyrwoll, P. (2023): *The Price and Value of Water: An Economic Review*. Cambridge Prisms: Water 1 (e3), 1–39. <https://www.doi.org/10.1017/wat.2023.2>.
- Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D. und Allen, R. G. (2018): The paradox of irrigation efficiency. *Science* 361 (6404), 748–750. <https://www.doi.org/10.1126/science.aat9314>.
- Graham, N. T., Hejazi, M. I., Chen, M., Davies, E. G., Edmonds, J. A., Kim, S. H., Turner, S. W., Li, X., Vernon, C. R. und Calvin, K. (2020a): Humans drive future water scarcity changes across all Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters* 15 (1), 014007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab639b>.
- Graham, N. T., Hejazi, M. I., Kim, S. H., Davies, E. G., Edmonds, J. A. und Miralles-Wilhelm, F. (2020b): Future changes in the trading of virtual water. *Nature communications* 11, 3632. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17400-4>.
- Gramlich, A., Stoll, S., Stamm, C., Walter, T. und Prasuhn, V. (2018): Effects of artificial land drainage on hydrology, nutrient and pesticide fluxes from agricultural fields – A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 266, 84–99. <https://www.doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.005>.
- Grant, L., Vanderkelen, I., Gudmundsson, L., Tan, Z., Perroud, M., Stepanenko, V. M., Debolskiy, A. V., Droppers, B., Janssen, A. B. G., Woolway, R. I., Choulga, M., Balsamo, G., Kirillin, G., Schewe, J., Zhao, F., del Valle, I. V., Golub, M., Pierson, D., Marcé, R., Seneviratne, S. I. und Thiery, W. (2021): Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing. *Nature Geoscience* 14 (11), 849–854. <https://www.doi.org/10.1038/s41561-021-00833-x>.
- Grebot, B., Illes, A., Madzharova, G., Scarlat, A., Anderson, N. und Fribourg-Blanc, B. (2019): *Urban Waste Water – Non-Connected Dwellings*. Final Report. Copenhagen: European Environment Agency (EEA).
- Grech-Madin, C., Döring, S., Kim, K. und Swain, A. (2018): Negotiating water across levels: A peace and conflict „Toolbox“ for water diplomacy. *Journal of Hydrology* 559, 100–109. <https://www.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.008>.
- Greif, A. (2006): *Institutions and the path to the modern economy: Lessons from medieval trade*. New York, USA: Cambridge University Press.

- Grieger, R., Capon, S. J., Hadwen, W. L. und Mackey, B. (2020): Between a bog and a hard place: a global review of climate change effects on coastal freshwater wetlands. *Climatic Change* 163 (1), 161–179. <https://www.doi.org/10.1007/s10584-020-02815-1>.
- Griffith, A. W. und Gobler, C. J. (2020): Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. *Harmful Algae* 91, 101590. <https://www.doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.008>.
- Grigoratos, T. und Martini, G. (2015): Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22 (4), 2491–2504. <https://www.doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>.
- Grimm, P. Y., Oliver, S., Merten, S., Han, W. W. und Wyss, K. (2022): Enhancing the Understanding of Resilience in Health Systems of Low- and Middle-Income Countries: A Qualitative Evidence Synthesis. *International Journal of Health Policy and Management* 11 (7), 899–911. <https://www.doi.org/10.34172/ijhpm.2020.261>.
- Große Hüttmann, M. (2020): Deliberation. *Europalexikon*. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-europalexikon/176777/deliberation/>, abgerufen am 14.05.2024.
- Gumbrecht, T., Roman-Cuesta, R. M., Verchot, L., Herold, M., Wittmann, F., Householder, E., Herold, N. und Murdiyarso, D. (2017): An expert system model for mapping tropical wetlands and peatlands reveals South America as the largest contributor. *Global Change Biology* 23 (9), 3581–3599. <https://www.doi.org/10.1111/gcb.13689>.
- Gupta, J., Liverman, D., Prodani, K., Aldunce, P., Bai, X., Broadgate, W., Ciobanu, D., Gifford, L., Gordon, C., Hurlbert, M., Inoue, C. Y. A., Jacobson, L., Kanie, N., Lade, S. J., Lenton, T. M., Obura, D., Okereke, C., Otto, I. M., Pereira, L., Rockström, J., Scholtens, J., Rocha, J., Stewart-Koster, B., David Tåbara, J., Rammelt, C. und Verborg, P. H. (2023): Earth system justice needed to identify and live within Earth system boundaries. *Nature Sustainability* 6 (6), 630–638. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-023-01064-1>.
- Gurreck, M. (2023): Informelle Administrativnormen im Unionsrecht. Baden-Baden: Nomos. <https://doi.org/10.5771/9783748917724>.
- Gut und Bösel (2024): Unserere Arbeit. Briesen (Mark): Gut und Bösel. <https://www.gutundboesel.org/arbeiten/>, abgerufen am 1.07.2024.
- Gutiérrez, J. S., Moore, J. N., Donnelly, J. P., Dorador, C., Navedo, J. G. und Senner, N. R. (2022): Climate change and lithium mining influence flamingo abundance in the Lithium Triangle. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 289 (1970), 20212388. <https://www.doi.org/10.1098/rspb.2021.2388>.
- GWP – Global Water Partnership (1996): Dublin-Rio Principles. Stockholm: GWP.
- GWP – Global Water Partnership (2019): Addressing Water in National Adaptation Plans: Water Supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines. Stockholm: GWP.
- GWP – Global Water Partnership (2024a): What is the WEFE Nexus? Stockholm: GWP. <https://www.gwp.org/en/sdg6support/iwrm-support/themes/water--energy--food--ecosystems-nexus/what-is-the-wefe-nexus/>, abgerufen am 4.6.2024.
- GWP – Global Water Partnership (2024b): National IWRM Plans. Stockholm: GWP. <https://iwrmmactionhub.org/fr/node/56>, abgerufen am 3.07.2024.
- H-BRS – Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (2019): CitizenLab: Wieviel Wasser speichert mein Boden? H-BRS: Sankt Augustin. <https://www.h-brs.de/de/news/citizenlab-wieviel-wasser-speichert-mein-boden>, abgerufen am 10.05.2024.
- Haapalehto, T. O., Vasander, H., Jauhiainen, S., Tahvanainen, T. und Kotiaho, J. S. (2011): The Effects of Peatland Restoration on Water-Table Depth, Elemental Concentrations, and Vegetation: 10 Years of Changes. *Restoration Ecology* 19 (5), 587–598. <https://www.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00704.x>.
- Habel, M., Mechkin, K., Podgorska, K., Saunes, M., Babi-ski, Z., Chalov, S., Absalon, D., Podgórski, Z. und Obolowski, K. (2020): Dam and reservoir removal projects: a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes. *Scientific Reports* 10 (1), 19210. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76158-3>.
- Habermas, J. (1992): Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Hachfeld, D., Terhorst, P. und Hoedeman, O. (2009): Progressive Public Water Management in Europe. In search of exemplary cases. Amsterdam, Brüssel: Transnational Institute (TNI), Corporate Europe Observatory (CEO). <https://www.epsu.org/article/progressive-public-water-management-europe-search-exemplary-cases>.
- Hack, J., Siegel, K., Disse, M., Evers, M., Taft, L., Heinz, I., Schulte, A., Reinhardt-Imjela, C., Krois, J. und Breuer, L. (2017): Aktuelle Forschungsfragen und Herausforderungen bei der Umsetzung des Integrierten Wasserressourcenmanagements unter Wasserknappheit. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung: HyWa* 61 (3), 195–206. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00019877>.
- Haerdle, B. (2018): Durstiges Europa. *Umwelt Perspektiven* 725. Leipzig: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). <http://www.schattenblick.de/infopool/umwelt/klima/uklfo725.html>.
- Haines, A. und Frumkin, H. (2021): Planetary health: safeguarding human health and the environment in the Anthropocene. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hajat, S., Proestos, Y., Araya-Lopez, J. L., Economou, T. und Lelieveld, J. (2023): Current and future trends in heat-related mortality in the MENA region: a health impact assessment with bias-adjusted statistically downscaled CMIP6 (SSP-based) data and Bayesian inference. *Lancet Planet Health* 7 (4), e282–e290. [https://www.doi.org/10.1016/s2542-5196\(23\)00045-1](https://www.doi.org/10.1016/s2542-5196(23)00045-1).
- Halkes, R. T., Hughes, A., Wall, F., Petavratzi, E., Pell, R. und Lindsay, J. J. (2024): Life cycle assessment and water use impacts of lithium production from salar deposits: Challenges and opportunities. *Resources, Conservation & Recycling* 207, 107554. <https://www.doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107554>.
- Hall, N. (2024): Surviving Scarcity: Water and the Future of the Middle East. Washington, D.C.: Center for Strategic and International Studies (CSIS). https://features.csis.org/surviving-scarcity-water-and-the-future-of-the-middle-east/?trk=feed-main-feed-card_reshare_feed-article-content, erschienen am 22.03.2024.
- Hallegatte, S., Shah, A., Brown, C., Lempert, R. und Gill, S. (2012): Investment decision making under deep uncertainty-application to climate change. Washington, D.C.: World Bank. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2143067.
- Hamadeh, N., van Rompaey, C., Metreau, E. und Eapen, S. G. (2022): New World Bank country classifications by income level: 2022–2023. World Bank: Washington, DC. <https://blogs.worldbank.org/opendata/new-world-bank-country-classifications-income-level-2022-2023>, abgerufen am 10.03.2023.
- Hamidov, A., Kasymov, U., Djumaboev, K. und Paul, C. (2022): Rebound Effects in Irrigated Agriculture in Uzbekistan: A Stakeholder-Based Assessment. *Sustainability* 14 (14), 8375. <https://www.doi.org/10.3390/su14148375>.
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., Lopez, R., Saenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshers, D. D. und Allen, C. D. (2022): Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications* 13 (1), 1761. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>.
- Han, J., Wang, C., Deng, S. und Lichtfouse, E. (2023): China's sponge cities alleviate urban flooding and water shortage: a review. *Environmental Chemistry Letters* 21 (3), 1297–1314. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01559-x>.
- Harlan, T. und Hennig, T. (2022): From mountains to megaregions: A powershed analysis of the Third Pole hydropower boom. *Global Environmental Change* 73, 102483. <https://www.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102483>.

- Harvey, G. L. und Henshaw, A. J. (2023): Rewilding and the water cycle. *WIREs Water* 10 (6), e1686. <https://www.doi.org/10.1002/wat2.1686>.
- Haygarth, P. M., Condron, L. M., Heathwaite, A. L., Turner, B. L. und Harris, G. P. (2005): The phosphorus transfer continuum: Linking source to impact with an interdisciplinary and multi-scaled approach. *Science of The Total Environment* 344 (1), 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.001>.
- HBS – Heinrich-Böll-Stiftung (2023): Wasser für die Landwirtschaft. HBS: Dresden. <https://weiterdenken.de/de/2023/03/11/wasser-fuer-die-landwirtschaft>, erschienen am 11.03.2023.
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J. und Bryan, B. A. (2021): Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications* 12, 4667. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>.
- Heck, K., Blumstein, S. und Johnso, F. (2022): Promoting Water Tenure for Food Security, Climate Resilience and Equity. Berlin: adelphi research gGmbH. https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/WT%20Workshop%20Report_final.pdf.
- Heiberg, J. und Truffer, B. (2022): The emergence of a global innovation system – A case study from the urban water sector. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 43, 270–288. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.04.007>.
- Heidler, A., Nesi, M., Nikiema, J. und Lüthi, C. (2023): Multi-lateral development banks investment behaviour in water and sanitation: findings and lessons from 60 years of investment projects in Africa and Asia. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 13 (5), 362–374. <https://doi.org/10.2166/washdev.2023.004>.
- Helbig, M., Waddington, J. M., Alekseychik, P., Amiro, B. D., Aurela, M., Barr, A. G., Black, T. A., Blanken, P. D., Carey, S. K., Chen, J., Chi, J., Desai, A. R., Dunn, A., Euskirchen, E. S., Flanagan, L. B., Forbrich, I., Friberg, T., Grelle, A., Harder, S., Heliasz, M., Humphreys, E. R., Ikawa, H., Isabelle, P.-E., Iwata, H., Jassal, R., Korkiakoski, M., Kurbatova, J., Kutzbach, L., Lindroth, A., Löfvenius, M. O., Lohila, A., Mammarella, I., Marsh, P., Maximov, T., Melton, J. R., Moore, P. A., Nadeau, D. F., Nicholls, E. M., Nilsson, M. B., Ohta, T., Peichl, M., Petrone, R. M., Petrov, R., Prokushkin, A., Quinton, W. L., Reed, D. E., Roulet, N. T., Runkle, B. R. K., Sonnentag, O., Strachan, I. B., Taillardat, P., Tuittila, E.-S., Tuovinen, J.-P., Turner, J., Ueyama, M., Varlagin, A., Wilking, M., Wofsy, S. C. und Zyryanov, V. (2020): Increasing contribution of peatlands to boreal evapotranspiration in a warming climate. *Nature Climate Change* 10 (6), 555–560. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-020-0763-7>.
- Heldt, S., Rodríguez-de-Francisco, J. C., Dombrowsky, I., Feld, C. K. und Karthe, D. (2017): Is the EU WFD suitable to support IWRM planning in non-European countries? Lessons learnt from the introduction of IWRM and River Basin Management in Mongolia. *Environmental Science & Policy* 75, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.05.009>.
- Heller, L., Karunanathan, M., Zwarteveen, M., Hall, D., Manahan, M. A. und Diouf, F. (2023): What water will the UN Conference carry forward: a fundamental human right or a commodity? *The Lancet* 402 (10404), 757–759. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01430-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01430-7).
- Helmke, G. und Levitsky, S. (2004): Informal institutions and comparative politics: A research agenda. *Perspectives on Politics* 2 (4), 725–740. <https://www.jstor.org/stable/3688540>.
- Helmrich, A., Chester, M., Miller, T. R. und Allenby, B. (2023): Lock-in: origination and significance within infrastructure systems. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* 3 (3), 032001. <https://www.doi.org/10.1088/2634-4505/acf7e6>.
- Hendryx, M., Zullig, K. J. und Luo, J. (2020): Impacts of Coal Use on Health. *Annual Review of Public Health* 41, 397–415. <https://www.doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040119-094104>.
- Henson, B. und Masters, J. (2023): The Libya floods: a climate and infrastructure catastrophe. New Haven, USA: Yale Climate Connections. <https://yaleclimateconnections.org/2023/09/the-libya-floods-a-climate-and-infrastructure-catastrophe/>, erschienen am 13.09.2023.
- Herbers, H. (2006): Handlungsmacht und Handlungsvermögen im Transformationsprozess: Schlussfolgerungen aus der Privatisierung der Landwirtschaft in Tadschikistan. *Geographica Helvetica* 61 (1), 13–20. <https://doi.org/10.5194/gh-61-13-2006>.
- Herbert, C. und Döll, P. (2019): Global assessment of current and future groundwater stress with a focus on transboundary aquifers. *Water Resources Research* 55 (6), 4760–4784. <https://doi.org/10.1029/2018WR023321>.
- Herman, F., De Doncker, F., Delaney, I., Prasicek, G. und Koppes, M. (2021): The impact of glaciers on mountain erosion. *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (6), 422–435. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-021-00165-9>.
- Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomas, R., Bejar-Pizarro, M., Lopez-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreon-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H. und Ye, S. (2021): Mapping the global threat of land subsidence. *Science* 371 (6524), 34–36. <https://www.doi.org/10.1126/science.abb8549>.
- Herrfahrdt-Pähle, E. (2010): South African water governance between administrative and hydrological boundaries. *Climate and Development* 2 (2), 111–127. <https://www.doi.org/10.3763/cdev.2010.0038>.
- Herrfahrdt-Pähle, E., Scheumann, W., Houdret, A. und Dombrowsky, I. (2019): Freshwater as a Global Commons. International Governance and the Role of Germany. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).
- High Court of South Africa (2008): Mazibuko and Others v. City of Johannesburg and Others. Case No. 06/13865. Urteil vom 30.5.2008. Johannesburg: High Court of South Africa. <https://www.saflii.org/za/cases/ZAGPHC/2008/491.pdf>.
- Hill-Lewis, G. (2023): Cape Town: Lessons from managing water scarcity. Washington, D.C.: Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/articles/cape-town-lessons-from-managing-water-scarcity/>, erschienen am 22.03.2023.
- Hiller, C. X., Hübner, U., Fajnorova, S., Schwartz, T. und Drewes, J. E. (2019): Antibiotic microbial resistance (AMR) removal efficiencies by conventional and advanced wastewater treatment processes: A review. *Science of the Total Environment* 685, 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.315>.
- Ho, J., Ahmadi, J., Schweikart, C., Hübner, U., Schwaller, C., Tiehm, A. und Drewes, J. E. (2024): Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. *Water Research*, 122429. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122429>.
- Hobbs, R. J., Higgs, E. und Harris, J. A. (2009): Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology & Evolution* 24 (11), 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.012>.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Käb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. und Steltzer, H. (2019): High Mountain Areas. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. und Weyer, N. M. (Hrsg.): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 131–202. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157964.004>.
- Hodgson, G. M. (2006): What are institutions? *Journal of economic issues* 40 (1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/00213624.2006.11506879>.
- Hoekstra, A. Y. und Hung, P. Q. (2002): Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water: Research Report Series 11*. Delft, Niederlande: IHE Delft Institute for Water Education. <https://www.waterfootprint.org/resources/Report11.pdf>.

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A., Aldaya, M. M. und Mekonnen, M. (2011): The water footprint assessment manual : setting the global standard. London, Washington, D.C: Routhledge.
- Hoekstra, A. Y. und Mekonnen, M. M. (2012): The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 109 (9), 3232–3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.
- Horlemann, L. und Dombrowsky, I. (2012): Institutionalising IWRM in developing and transition countries: the case of Mongolia. *Environmental Earth Sciences* 65, 1547–1559. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1213-7>.
- Hornidge, A.-K. und Scholtes, F. (2009): Waiting for the water to come? Poverty reduction in times of global climate change. Bonn: CARE Deutschland-Luxemburg e.V., Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssor-323148>.
- Hornidge, A.-K., Oberkircher, L., Tischbein, B., Schorcht, G., Bhaduri, A. und Manschadi, A. M. (2011): Reconceptualizing water management in Khorezm, Uzbekistan. *Natural Resources Forum* 35 (4), 251–268. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01391.x>.
- Hornidge, A.-K. und Scholtes, F. (2011): Climate Change and Everyday Life in Toineke Village, West Timor: Uncertainties, Knowledge and Adaptation. *Sociologus* 61 (2), 151–175. <https://www.jstor.org/stable/43645696>.
- Hornidge, A.-K., Oberkircher, L. und Kudryavtseva, A. (2013): Boundary management and the discursive sphere–Negotiating ‘realities’ in Khorezm, Uzbekistan. *Geoforum* 45, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.11.014>.
- Hornidge, A.-K., Oberkircher, L., Tischbein, B., Schorcht, G., Bhaduri, A., Awan, U. K. und Manschadi, A. M. (2016): Reconceptualising Water Management in Khorezm, Uzbekistan. In: Borchardt, D., Bogardi, J. J. und Ibisch, R. B. (Hrsg.): *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Basel: Springer Cham, 569–602. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_22.
- Hornidge, A.-K., McDonald-Bärtl, A. J. und Pieterse, E. (2023): Science and Digitalization for a Better Future. Issue Paper Think7 Advisory Process (Japan). Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).
- Houdret, A. (2012): The Water Connection: Irrigation, Water Grabbing and Politics in Southern Morocco. *Water Alternatives* 5 (2), 284–303.
- Houdret, A., Dombrowsky, I. und Horlemann, L. (2014): The institutionalization of River Basin Management as politics of scale–Insights from Mongolia. *Journal of Hydrology* 519, 2392–2404. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.037>.
- Houdret, A. (2021): How Can Water Sector Cooperation Support Democratic Governance? Insights from Morocco. *Middle East Law and Governance* 13 (1), 72–97. <https://doi.org/10.1163/18763375-13010004>.
- Houdret, A. und Amichi, H. (2022): The rural social contract in Morocco and Algeria: reshaping through economic liberalisation and new rules and practices. *The Journal of North African Studies* 27 (4), 641–662. <https://doi.org/10.1080/13629387.2020.1848560>.
- Houdret, A. und Heinz, R. (2022): Groundwater governance through institutional bricolage? Participation in Morocco’s Chtouka aquifer contract. *Water International* 47 (4), 565–582. <https://doi.org/10.1080/02508060.2022.2049545>.
- Houdret, A. und von Lossow, T. (2023): Water crises – water opportunities: Promoting water cooperation in the Middle East. Clingendael Report. Den Haag: The Netherlands Institute of International Relations (Clingendael).
- Hu, F. und Tan, D. (2018): No Water, No Growth – Does Asia have enough water to develop? Hong Kong: China Water Risk (CWR).
- Huang, A.-J. (2022): Disclosable Restructuring Paper - Lusaka Sanitation Project - P149091 (English). Washington, D.C.: World Bank Group.
- Hubbard, S. C., Meltzer, M. I., Kim, S., Malambo, W., Thornton, A. T., Shankar, M. B., Adhikari, B. B., Jeon, S., Bampoe, V. D. und Cunningham, L. C. (2020): Household illness and associated water and sanitation factors in peri-urban Lusaka, Zambia, 2016–2017. *NPJ Clean Water* 3 (1), 26. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0076-4>.
- Huggins, X., Gleeson, T., Kummu, M., Zipper, S. C., Wada, Y., Troy, T. J. und Famiglietti, J. S. (2022): Hotspots for social and ecological impacts from freshwater stress and storage loss. *Nature Communications* 13 (1), 439. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-022-28029-w>.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F. und Käb, A. (2021): Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 592 (7856), 726–731. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.
- Hugron, S., Guéné-Nanchen, M., Roux, N., LeBlanc, M.-C. und Rochefort, L. (2020): Plant reintroduction in restored peatlands: 80% successfully transferred – Does the remaining 20% matter? *Global Ecology and Conservation* 22, e01000. <https://www.doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01000>.
- Huinink, J. (2022): Messung von sozialer Ungleichheit. In: Baur, N. und Blasius, J. (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer, 1037–1049. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18939-0_82.
- Huitema, D. und Meijerink, S. V. (2017): The politics of river basin organisations: coalitions, institutional design choices and consequences. *Ecology and Society* 22 (2), 42. <http://www.jstor.org/stable/26270064>.
- Hunzai, K., Gerlitz, J. und Hoermann, B. (2011): Understanding mountain poverty in the Hindu Kush-Himalayas: Regional report for Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, China, India, Myanmar, Nepal, and Pakistan. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.553>.
- Huss, M. und Hock, R. (2018): Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change* 8 (2), 135–140. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>.
- Hutton, G. und Varughese, M. C. (2016): The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water Sanitation, and Hygiene. *Water and Sanitation Program: Technical Paper 103171*. Washington, D.C.: World Bank Group.
- Ibisch, R. B., Bogardi, J. J. und Borchardt, D. (2016a): Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation. In: Borchardt, D., Bogardi, J. J. und Ibisch, R. B. (Hrsg.): *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Cham: Springer, 3–32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_1.
- Ibisch, R. B., Leidel, M., Niemann, S., Hornidge, A.-K. und Goedert, R. (2016b): Capacity Development for Integrated Water Resources Management: Lessons Learned from Applied Research Projects. In: Borchardt, D., Bogardi, J. J. und Ibisch, R. B. (Hrsg.): *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Cham: Springer, 335–373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_14.
- Iceland, C. und Black, C. (2023): UN Water Conference 2023: Not Enough Game-changing Commitments. Washington, D.C.: World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/insights/un-water-conference-2023-needed-outcomes>, erg schienen am 30.03.2023.
- ICIMOD – International Centre for Integrated Mountain Development (2023): Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook. [Wester, P., Chaudhary, S., Chettri, N., Jackson, M., Maharjan, A., Nepal, S. und Steiner, J. F. (eds.)]. Kathmandu, Nepal: ICIMOD. <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1028>.
- ICJ – International Court of Justice (1997): *GabCikovo-Nagymaros Project (Hungary/Slovakia)*, Judgment, I.C.J. Reports 1997, p. 7. Den Haag: ICJ. <https://www.icj-cij.org/sites/default/files/case-related/92/092-19970925-JUD-01-00-EN.pdf>.

- IEEP - Institute for European Environmental Policy, Trinomics, IVM – Institute for Environmental Studies und UNEP-WCMC – United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (2021): Methodology for assessing the impacts of trade agreements on biodiversity and ecosystems. Service contract for the European Commission (No 07.0202/2019/812941/SER/ENV.D.2). Brüssel/London: IEEP. https://environment.ec.europa.eu/document/download/af910298-f32d-4c52-beb1-e7236a91d359_en?filename=Methodology-for-assessing-the-impacts-of-trade-agreements-on-biodiversity-and-ecosystems.pdf.
- IFRS – International Financial Reporting Standards (2023): IFRS S2 Climate-related Disclosures with the TCFD Recommendations. London: IFRS. <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/supporting-implementation/ifrs-s2/ifrs-s2-comparison-tcfd-july2023.pdf>.
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T. und Baillie, J. E. M. (2020): Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature* 577 (7790), 364–369. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>.
- IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2018a): The IPBES assessment report on land degradation and restoration. [Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.)]. Bonn: IPBES secretariat.
- IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2018b): The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia [Rounsevell, M., Fischer, M., Torre-Marín Rando, A., Mader, A. (eds.)]. Bonn: IPBES secretariat.
- IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019a): Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service [Brondizio, E. S., Settele, J., Diaz, S., Ngo, H. T (eds.)]. Bonn: IPBES secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.
- IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019b): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des globalen Assessments der biologischen Vielfalt und Ökosystemleistungen der Zwischenstaatlichen Plattform für Biodiversität und Ökosystemleistungen. In: Díaz, S., Settele, J., Brondizio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., Arnet, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razaque, J., Reyers, B., Roy Chowdhury, R., Shin, Y. J., Visseren-Hamakers, I. J., Willis, K. J. und Zayas, C. N. (Hrsg.): Globaler Bewertungsbericht über die biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen. Bonn: IPBES secretariat, 1–56.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019a): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rana, B. und Weyer, N.M. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019b): Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, R. Slade, P., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M. und Malley, J. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021a): Technical Summary. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 33–144. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.002>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021b): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021c): Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3–32. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022a): Technical Summary. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (Hrsg.): Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 37–118. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.002>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022b): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S. und Malley, J. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157926>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2022c): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023a): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Lee, H. und Romero, J. (eds.)]. Genf: IPCC. <https://www.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b): Summary for Policymakers. In: Lee, H. und Romero, J. (Hrsg.): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf: IPCC, 1–34. <https://www.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- IPSF – International Platform on Sustainable Finance (2023): Annual Report 2023. https://finance.ec.europa.eu/document/download/cb307a8e-8b9a-4360-8dff-64110a6187d9_en?filename=231204-ipsf-annual-report_en.pdf.

- ISC – International Science Council (2021): Unleashing Science: Delivering Missions for Sustainability. Paris: ISC. <https://www.doi.org/10.24948/2021.04>.
- ISRIC – World Soil Information (2024): Green Water Credits (GWC). Wageningen: ISRIC. <https://www.isric.org/projects/green-water-credits-gwc>, abgerufen am 4.06.2024.
- IUCN – International Union for Conservation of Nature (2021): Peatlands and Climate change. Gland, Schweiz: IUCN. https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-04/iucn_issues_brief_peatlands_and_climate_change_final_nov21.pdf.
- IWA – International Water Association (2022): Lessons Learnt: Regulating for Citywide Inclusive Sanitation. London: IWA.
- IWMI – International Water Management Institute (2024): IWMI in Middle East and North Africa. Colombo, Sri Lanka: IWMI. <https://www.iwmi.cgiar.org/about/where-we-work/iwmi-in-the-middle-east-and-north-africa/>, abgerufen am 25.06.2024.
- Jackson, M., Azam, M. F., Baral, P., Benestad, R., Brun, F., Muhammad, S., Pradhananga, S., Shrestha, F., Steiner, J. F. und Thapa, A. (2023): Consequences of climate change for the cryosphere in the Hindu Kush Himalaya. In: ICIMOD – International Centre for Integrated Mountain Development, Wester, P., Chaudhary, S., Chettri, N., Jackson, M., Maharjan, A., Nepal, S. und Steiner, J. F. (Hrsg.): Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 17–71. <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1030>.
- Jacobsen, D., Milner, A. M., Brown, L. E. und Dangles, O. (2012): Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature Climate Change* 2 (5), 361–364. <https://www.doi.org/10.1038/nclimate1435>.
- Jane, S. F., Hansen, G. J. A., Kraemer, B. M., Leavitt, P. R., Mincer, J. L., North, R. L., Pilla, R. M., Stetler, J. T., Williamson, C. E., Woolway, R. I., Arvola, L., Chandra, S., DeGasperi, C. L., Diemer, L., Dunalska, J., Erina, O., Flaim, G., Grossart, H. P., Hambright, K. D., Hein, C., Hejzlar, J., Janus, L. L., Jenny, J. P., Jones, J. R., Knoll, L. B., Leoni, B., Mackay, E., Matsuzaki, S. S., McBride, C., Muller-Navarra, D. C., Paterson, A. M., Pierson, D., Rogora, M., Rusak, J. A., Sadro, S., Saulnier-Talbot, E., Schmid, M., Sommaruga, R., Thiery, W., Verborg, P., Weathers, K. C., Weyhenmeyer, G. A., Yokota, K. und Rose, K. C. (2021): Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature* 594 (7861), 66–70. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O. und Kirchner, J. W. (2024): Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature* 625, 715–721. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>.
- Jeppesen, E., Bekliou-lu, M. und Zadereev, E. (2023): The Effects of Global Climate Change on Water Level and Salinity: Causes and Effects. *Water* 15 (15), 2853. <https://www.doi.org/10.3390/w15152853>.
- Jequier, E. und Constant, F. (2010): Water as an essential nutrient: the physiological basis of hydration. *European Journal of Clinical Nutrition* 64 (2), 115–123. <https://www.doi.org/10.1038/ejcn.2009.111>.
- Jimenez, A. und Bray, B. (2022): Blending Water Management and Climate Change Adaptation Approaches. Copenhagen: UNEP-DHI Centre on Water and Environment.
- Jin, H., Huang, Y., Bense, V. F., Ma, Q., Marchenko, S. S., Shepelev, V. V., Hu, Y., Liang, S., Spektor, V. V., Jin, X., Li, X. und Li, X. (2022): Permafrost Degradation and Its Hydrogeological Impacts. *Water* 14 (3), 372. <https://www.doi.org/10.3390/w14030372>.
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A. und Scherer, L. (2019a): Supplementary information: Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115, 1–41. <https://www.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>.
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A. und Scherer, L. (2019b): Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115, 109391. <https://www.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>.
- Jin, Y., Hu, S., Ziegler, A. D., Gibson, L., Campbell, J. E., Xu, R., Chen, D., Zhu, K., Zheng, Y., Ye, B., Ye, F. und Zeng, Z. (2023): Energy production and water savings from floating solar photovoltaics on global reservoirs. *Nature Sustainability* 6 (7), 865–874. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-023-01089-6>.
- Jones, E. R., Bierkens, M. F., van Puijenbroek, P. J., van Beek, L. P., Wanders, N., Sutanudjaja, E. H. und van Vliet, M. T. (2023): Sub-Saharan Africa will increasingly become the dominant hotspot of surface water pollution. *Nature Water* 1, 602–613. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00105-5>.
- Kačergytė, I., Arlt, D., Berg, Å., Žmihorski, M., Knappe, J., Rosin, Z. M. und Pärt, T. (2021): Evaluating created wetlands for bird diversity and reproductive success. *Biological Conservation* 257, 109084. <https://www.doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109084>.
- Kagohashi, K., Tsurumi, T. und Managi, S. (2015): The effects of international trade on water use. *PloS one* 10 (7), e0132133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132133>.
- Kahle, M. und Nöh, I. (2009): Biozide in Gewässern: Eintragspfade und Informationen zur Belastungssituation und deren Auswirkungen. UBA-Texte 09/2009. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/38111.pdf>.
- Kairigo, P., Ngumba, E., Sundberg, L.-R., Gachanja, A. und Tuhkanen, T. (2020): Contamination of Surface Water and River Sediments by Antibiotic and Antiretroviral Drug Cocktails in Low and Middle-Income Countries: Occurrence, Risk and Mitigation Strategies. *Water* 12 (5), 1376. <https://www.doi.org/10.3390/w12051376>.
- Kalia, B. (2020): Water Crisis in Cities: The Case of ‘Day Zero’ in Chennai, India. Berlin: Technische Universität Berlin, International Conference on Sustainable Development 2020. <https://ic-sd.org/wp-content/uploads/2020/11/Bhriku-Kalia.pdf>.
- Kalisz, S., Kibort, K., Mioduska, J., Lieder, M. und Małachowska, A. (2022): Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas – A review. *Journal of Environmental Management* 304, 114239. <https://www.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114239>.
- Karakurt, S., Schmid, L., Hübner, U. und Drewes, J. E. (2019): Dynamics of Wastewater Effluent Contributions in Streams and Impacts on Drinking Water Supply via Riverbank Filtration in Germany—A National Reconnaissance. *Environmental Science & Technology* 53 (11), 6154–6161. <https://www.doi.org/10.1021/acs.est.8b07216>.
- Karakurt-Fischer, S., Sanz-Prat, A., Greskowiak, J., Ergh, M., Gerdes, H., Massmann, G., Ederer, J., Regnery, J., Hübner, U. und Drewes, J. E. (2020): Developing a novel biofiltration treatment system by coupling high-rate infiltration trench technology with a plug-flow porous-media bioreactor. *Science of The Total Environment* 722, 137890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137890>.
- Karakurt-Fischer, S., Rien, C., Sanz-Prat, A., Szweczyk, R., Hübner, U., Drewes, J. E. und Selinka, H.-C. (2021): Fate and Transport of Viruses within a High-Rate Plug-Flow Biofilter Designed for Non-Membrane-Based Indirect Potable Reuse Applications. *ACS ES&T Water* 1 (5), 1229–1239. <https://www.doi.org/10.1021/acsestwater.0c00305>.
- Karakurt-Fischer, S., Johnson, D. R., Fenner, K. und Hafner, J. (2023): Making waves: Enhancing pollutant biodegradation via rational engineering of microbial consortia. *Water Res* 247, 120756. <https://www.doi.org/10.1016/j.watres.2023.120756>.
- Kaushal, S. S., Gold, A. J. und Mayer, P. M. (2017): Land Use, Climate, and Water Resources-Global Stages of Interaction. *Water* 9 (10), 815. <https://www.doi.org/10.3390/w9100815>.
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Pace, M. L., Reimer, J. E., Maas, C. M., Galella, J. G., Utz, R. M., Duan, S., Kryger, J. R. und Yaculak, A. M. (2021): Freshwater salinization syndrome: From emerging global problem to managing risks. *Biogeochemistry* 154, 255–292. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00784-w>.
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Mayer, P. M., Shatkay, R. R., Shelton, S. A., Grant, S. B., Utz, R. M., Yaculak, A. M., Maas, C. M., Reimer, J. E., Bhide, S. V., Malin, J. T. und Pippy, M. A. (2023): The anthropogenic salt cycle. *Nature Reviews Earth & Environment* 4 (11), 770–784. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-023-00485-y>.

- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Nicholson, E., Bishop, M. J., Polidoro, B. A., Ramirez-Llodra, E., Tozer, M. G., Nel, J. L., Mac Nally, R., Gregr, E. J., Watermeyer, K. E., Essl, F., Faber-Langendoen, D., Franklin, J., Lehmann, C. E. R., Etter, A., Roux, D. J., Stark, J. S., Rowland, J. A., Brummitt, N. A., Fernandez-Arcaya, U. C., Suthers, I. M., Wiser, S. K., Donohue, I., Jackson, L. J., Pennington, R. T., Iliffe, T. M., Gerovasileiou, V., Giller, P., Robson, B. J., Pettorelli, N., Andrade, A., Lindgaard, A., Tahvanainen, T., Terauds, A., Chadwick, M. A., Murray, N. J., Moat, J., Plischoff, P., Zager, I. und Kingsford, R. T. (2022): A function-based typology for Earth's ecosystems - Appendix S4. The IUCN Global Ecosystem Typology v2.1: Descriptive profile for Biomes and Ecosystem Functional Groups. Content version: v2.1, updated 2022-04-06. *Nature*, 513–518. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-022-05318-4>.
- Kelly, J. C., Wang, M., Dai, Q. und Winjobi, O. (2021): Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation & Recycling* 174, 105762. <https://www.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762>.
- Kendzia, N. (2020): Bewässern nach Regeln - Wasserbedarf urbaner Grünflächen. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (ALB).
- Keremane, B. und McKay, B. (2007): Self-created Rules and Conflict Management Processes: The Case of Water Users' Associations on Waghad Canal in Maharashtra, India. *International Journal of Water Resources Development* 22 (4), 543–559. <https://doi.org/10.1080/07900620600779673>.
- Keynouth, B. (2022): Severe sand and dust storms are an underrated risk in the Gulf region, despite mitigation measures. Washington, D.C.: Middle East Institute. <https://www.mei.edu/publications/severe-sand-and-dust-storms-are-underrated-risk-gulf-region-despite-mitigation>, erschienen am 14.03.2022.
- Khemka, R., Lopez, P. und Jensen, O. (2023): Scaling Up Finance for Water: A WBG Strategic Framework and Roadmap for Action. Washington, D.C.: World Bank Group.
- Kim, E. A. und Hornidge, A.-K. (2016): IWRM in Uzbekistan: a global concept with local consequences. In: Ibbisch, R. B., Bogardi, J. J. und Borchardt, D. (Hrsg.): *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Cham: Springer Nature, 201–219. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_9.
- King-Okumu, C. (2021): A rapid review of drought risk mitigation measures – Integrated drought management. Rom: Food and Agriculture Organization (FAO). <https://doi.org/10.4060/cb7085en>.
- Kinna, R. und Rieu-Clarke, A. (2017): The Governance Regime of the Mekong River Basin. Can the Global Water Conventions Strengthen the 1995 Mekong Agreement? *International Water Law* 2 (1), 1–84. <https://www.doi.org/10.1163/23529369-12340005>.
- Kirrane, E. F., Luben, T. J., Benson, A., Owens, E. O., Sacks, J. D., Dutton, S. J., Madden, M. und Nichols, J. L. (2019): A systematic review of cardiovascular responses associated with ambient black carbon and fine particulate matter. *Environment International* 127, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.027>.
- Kirschner, A. (2020): Grenzüberschreitende Implikationen eines Menschenrechts auf Wasser? Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60773-2>.
- Kittikhoun, A. und Staubli, D. M. (2018): Water diplomacy and conflict management in the Mekong: From rivalries to co-operation. *Journal of Hydrology* 567, 654–667. <https://www.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.059>.
- Klassen, S. und Evans, D. (2020): Top-down and bottom-up water management: A diachronic model of changing water management strategies at Angkor, Cambodia. *Journal of Anthropological Archaeology* 58, 101166. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101166>.
- Klinger, M., Gueye, A., Sherpa, A. M. und Strande, L. (2019): Scoping study: faecal sludge treatment plants in South-Asia and sub-Saharan Africa. *Gates Open Res* 3, 1716. <https://doi.org/10.21955/gatesopenres.1116557.1>.
- Kloepfer, M. und Durner, W. (2020): *Umweltschutzrecht*. München: C.H. Beck.
- Kloke-Lesch, A. und Hornidge, A.-K. (2023): Embrace Multipolarity: Germany Must Act European for the Global Common Good. Berlin: 49security. <https://fourninesecurity.de/2023/01/26/embrace-multipolarity-germany-must-act-european-for-the-global-common-good>, erschienen am 25.01.2023.
- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M. und De France, J. (2019): Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research* 155, 410–422. <https://www.doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>.
- Kohler, C., Breninek, P. und Hasenauer, C. (2023): Wasserentnahmen in Bayern: Wie ahnungslos die Behörden sind. München: Bayerischer Rundfunk. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/wasserentnahmen-in-bayern-so-ahnungslos-sind-die-behoerden,TeRVVWD>, erschienen am 20.05.2023.
- Komives, K., Foster, V., Halpern, J. und Wodon, Q. (2005): Water, electricity, and the poor: Who benefits from utility subsidies? Washington, D.C.: World Bank Publications. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/606521468136796984/pdf/343340REPLACEMENT10082136342501PUBLIC1.pdf>.
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y. und Mann, M. E. (2020): Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications* 11, 3044. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>.
- Kosmowski, F. (2018): Soil water management practices (terraces) helped to mitigate the 2015 drought in Ethiopia. *Agricultural Water Management* 204, 11–16. <https://www.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.025>.
- Koutroulis, A., Papadimitriou, L., Grillakis, M., Tsanis, I., Warren, R. und Betts, R. (2019): Global water availability under high-end climate change: A vulnerability based assessment. *Global and Planetary Change* 175, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.013>.
- Kowarsch, M. (2012): Wie sollte die Nutzung des knappen Gutes Süßwasser geregelt werden? In: Maring, M. (Hrsg.): *Globale öffentliche Güter in interdisziplinären Perspektiven*. Band 5. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 161–178.
- Kraaijenbrink, P. D., Stigter, E. E., Yao, T. und Immerzeel, W. W. (2021): Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. *Nature Climate Change* 11 (7), 591–597. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01074-x>.
- Kraemer, B. M., Pilla, R. M., Woolway, R. I., Anneville, O., Ban, S., Colom-Montero, W., Devlin, S. P., Dokulil, M. T., Gaiser, E. E., Hambright, K. D., Hessen, D. O., Higgins, S. N., Jöhnk, K. D., Keller, W., Knoll, L. B., Leavitt, P. R., Lepori, F., Luger, M. S., Maberly, S. C., Müller-Navarra, D. C., Paterson, A. M., Pierson, D. C., Richardson, D. C., Rogora, M., Rusak, J. A., Sadro, S., Salmaso, N., Schmid, M., Silow, E. A., Sommaruga, R., Stelzer, J. A. A., Stralle, D., Thiery, W., Timofeyev, M. A., Verburg, P., Weyhenmeyer, G. A. und Adrian, R. (2021): Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nature Climate Change* 11 (6), 521–529. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-021-01060-3>.
- Kreyling, J., Tanneberger, F., Jansen, F., van der Linden, S., Aggenbach, C., Blüml, V., Couwenberg, J., Emsens, W. J., Joosten, H., Klimkowska, A., Kotowski, W., Kozub, L., Lennartz, B., Liczner, Y., Liu, H., Michaelis, D., Oehmke, C., Parakenings, K., Pleyl, E., Poyda, A., Raabe, S., Röhl, M., Rücker, K., Schneider, A., Schrautzer, J., Schröder, C., Schug, F., Seeber, E., Thiel, F., Thiele, S., Tiemeyer, B., Timmermann, T., Urich, T., van Diggelen, R., Vegelin, K., Verbruggen, E., Wilmking, M., Wrage-Mönnig, N., Wolejko, L., Zak, D. und Jurasinski, G. (2021): Rewetting does not return drained fen peatlands to their old selves. *Nature Communications* 12 (1), 5693. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-021-25619-y>.
- Krishnamurthy, L., Krishnamurthy, P. K., Rajagopal, I. und Peralta Solares, A. (2019): Can agroforestry systems thrive in the drylands? Characteristics of successful agroforestry systems in the arid and semi-arid regions of Latin America. *Agroforestry Systems* 93 (2), 503–513. <https://www.doi.org/10.1007/s10457-017-0143-0>.

- Kruk, M. E., Ling, E. J., Bitton, A., Cammett, M., Cavanaugh, K., Chopra, M., el-Jardali, F., Macauley, R. J., Muraguri, M. K., Konuma, S., Marten, R., Martineau, F., Myers, M., Rasanathan, K., Ruelas, E., Soucat, A., Sugihantono, A. und Warnken, H. (2017): Building resilient health systems: a proposal for a resilience index. *BMJ* 357, j2323. <https://www.doi.org/10.1136/bmj.j2323>.
- Kumar, A., Kumar, A., Chaturvedi, A. K., Joshi, N., Mondal, R. und Malyan, S. K. (2023a): Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: mechanistic understanding of influencing factors and future prospect. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–18. <https://www.doi.org/10.1007/s11356-023-25717-y>.
- Kumar, V., Singh, E., Singh, S., Pandey, A. und Bhargava, P. C. (2023b): Micro- and nano-plastics (MNPs) as emerging pollutant in ground water: Environmental impact, potential risks, limitations and way forward towards sustainable management. *Chemical Engineering Journal* 459, 141568. <https://www.doi.org/10.1016/j.cej.2023.141568>.
- Kumar, V., Parihar, R. D., Sharma, A., Bakshi, P., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Karaozas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., Gyasi-Agyei, Y. und Rodrigo-Comino, J. (2019): Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere* 236, 124364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364>.
- Kumari, M. und Pulimi, M. (2023): Phthalate esters: occurrence, toxicity, bioremediation, and advanced oxidation processes. *Water Science and Technology* 87 (9), 2090–2115. <https://www.doi.org/10.2166/wst.2023.119>.
- Kundzewicz, Z. W. (2008): Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecology & Hydrobiology* 8 (2–4), 195–203. <https://www.doi.org/10.2478/v10104-009-0015-y>.
- Kurian, M. (2017): The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development. *Environmental Science & Policy* 68, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.11.006>.
- Kuzma, S., Saccoccia, L. und Chertock, M. (2023): 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. Washington, D.C.: World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>, erschienen am 16.08.2023.
- LADWP – Los Angeles Department of Water and Power (2024): Water System. Los Angeles: LADWP. <https://www.ladwp.com/who-we-are/water-system>, abgerufen am 20.06.2024.
- Lafrenière, M. J. und Lamoureux, S. F. (2019): Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews* 191, 212–223. <https://www.doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.018>.
- Laghari, A. N., Abbasi, H. U., Aziz, A. und Kanasro, N. A. (2015): Impact analyses of upstream water infrastructure development schemes on downstream flow and sediment discharge and subsequent effect on Deltaic region. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)* 47 (4), 805–808.
- Langer, M., von Deimling, T. S., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S., Rachold, V., Schultz, M., Oehme, A. und Grosse, G. (2023): Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. *Nature Communications* 14 (1), 1721. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4>.
- Lardoux de Pazzis, A. und Muret, A. (2021): The role of intermediaries to facilitate water-related investment. *OECD Environment Working Papers* No. 180. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). <https://doi.org/10.1787/19970900>.
- Larsson, D. G. J. und Flach, C.-F. (2022): Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology* 20 (5), 257–269. <https://www.doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x>.
- Laskowski, S. R. (2010): Das Menschenrecht auf Wasser. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Lau, S. C. Y., Wilson, N. G., Golledge, N. R., Naish, T. R., Watts, P. C., Silva, C. N. S., Cooke, I. R., Allcock, A. L., Mark, F. C., Linse, K. und Strugnell, J. M. (2023): Genomic evidence for West Antarctic Ice Sheet collapse during the Last Interglacial. *Science* 382 (6677), 1384–1389. <https://www.doi.org/10.1126/science.ade0664>.
- Laubenstein, H., Connor, R., Leflaive, X., Smythe, H., Dhot, N., Austin, M., Kjellén, M., Saleh, A. und Trombitaia, I. (2023): Chapter 12: Financing. In: UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (Hrsg.): *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and co-operation for water*. Paris: UNESCO, 162–171.
- Lavenex, S. (2014): The power of functionalist extension: how EU rules travel. *Journal of European Public Policy* 21 (6), 885–903. <https://www.doi.org/10.1080/13501763.2014.910818>.
- Laville, S., Leach, A. und Aguilar García, C. (2023): In charts: how privatisation drained Thames Water's coffers. London: The Guardian. <https://www.theguardian.com/business/2023/jun/30/in-charts-how-privatisation-drained-thames-waters-coffers>, erschienen am 30.06.2023.
- Law, A., Gaywood, M. J., Jones, K. C., Ramsay, P. und Willby, N. J. (2017): Using ecosystem engineers as tools in habitat restoration and rewilding: beaver and wetlands. *Science of The Total Environment* 605–606, 1021–1030. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.173>.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2021): Auf dem Weg zur wassersensiblen Stadtentwicklung: Erfordernisse aus Sicht der Wasserwirtschaft. Berlin: Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz von Berlin.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2022): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Berlin: LAWA.
- Lee, D., Gibson, J. M., Brown, J., Habtewold, J. und Murphy, H. M. (2023): Burden of disease from contaminated drinking water in countries with high access to safely managed water: A systematic review. *Water Research* 242, 120244. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120244>.
- Lees, M., Knight, R. und Smith, R. (2022): Development and Application of a 1D Compaction Model to Understand 65 Years of Subsidence in the San Joaquin Valley. *Water Resources Research* 58 (6), e2021WR031390. <https://www.doi.org/10.1029/2021WR031390>.
- Lepenies, P. und Sieler, S. (2010): Die Messung der mehrdimensionalen Armut – Was kann der neue Index? KfW-Development Research. Fokus Entwicklungspolitik Nr. 9. Frankfurt am Main: KfW Entwicklungsbank. https://www.kfw-entwicklungsbank.de/Download-Center/PDF-Dokumente-Development-Research/2010_11_FE_Lepenies-Messung-mehrdimensionale-Armut_D.pdf.
- Levy, W., Pandelova, M., Henkelmann, B., Bernhöft, S., Fischer, N., Anritter, F. und Schramm, K.-W. (2017): Persistent organic pollutants in shallow percolated water of the Alps Karst system (Zugspitze summit, Germany). *Science of The Total Environment* 579, 1269–1281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.113>.
- LfU Bayern – Bayrisches Landesamt für Umwelt (2024): Wasser: Trinkwasserschutzgebiete - Kooperation mit Landwirten. Augsburg: LfU Bayern. https://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasserschutzgebiete/kooperation_mit_landwirten/index.htm, abgerufen am 1.07.2024.
- Li, C., Busquets, R. und Campos, L. C. (2020): Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Science of The Total Environment* 707, 135578. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135578>.
- Libanda, B., Rand, E., Gyang, G. N., Sindano, C. T., Simwanza, L. und Chongo, M. (2024): Recent and future exposure of water, sanitation, and hygiene systems to climate-related hazards in Zambia. *Journal of Water and Climate Change* 15 (3), 958–977. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.392>.

- Liess, M., Böhme, A., Gröning, J., Liebmann, L., Lück, M., Reemtsma, T., Römerscheid, M., Schade, U., Schwarz, B., Vormeier, P. und O., W. (2023): Belastung von kleinen Gewässern in der Agrarlandschaft mit Pflanzenschutzmittel-Rückständen – TV1 Datenanalyse zur Pilotstudie Kleingewässermonitoring 2018/2019. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/belastung-von-kleinen-gewaessern-in-der-0>.
- Lima de Miranda, K. und Snower, D. J. (2020): Recoupling Economic and Social Prosperity. *Global Perspectives* 1 (1), 11867. <https://doi.org/10.1525/001c.11867>.
- Lipp, H. P. und Lipp, A. (2022): Arzneimittelmückstände in Gewässern. *Die Urologie* 61 (11), 1208–1216. <https://www.doi.org/10.1007/s00120-022-01934-0>.
- Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A. K., Hoff, H., Lawford, R., Qi, J., Strasser, L. d., Yillia, P. T. und Zheng, C. (2017): Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus. *Hydrological Sciences Journal* 62 (11), 1714–1720. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1353695>.
- Liu, J., Mao, G., Hoekstra, A. Y., Wang, H., Wang, J., Zheng, C., van Vliet, M. T. H., Wu, M., Ruddell, B. und Yan, J. (2018): Managing the energy–water–food nexus for sustainable development. *Applied Energy* 210, 377–381. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.064>.
- Liu, L., Wang, W., Yan, X., Shen, M. und Chen, H. (2023): The cascade influence of grain trade shocks on countries in the context of the Russia-Ukraine conflict. *Humanities and Social Sciences Communications* 10, 449. <https://www.doi.org/10.1057/s41599-023-01944-z>.
- Liu, P.-W., Famiglietti, J. S., Purdy, A. J., Adams, K. H., McEvoy, A. L., Reager, J. T., Bindlish, R., Wiese, D. N., David, C. H. und Rodell, M. (2022): Groundwater depletion in California's Central Valley accelerates during megadrought. *Nature Communications* 13 (1), 7825. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35582-x>.
- Llamas, M. R. und Martínez-Santos, P. (2005): Intensive groundwater use: Silent revolution and potential source of social conflicts. *Journal of Water Resources Planning and Management* 131 (5), 337–341. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:5\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:5(337)).
- Lohrmann, A., Farfan, J., Lohrmann, C., Kölbels, J. F. und Pettersson, F. (2023): Troubled waters: Estimating the role of the power sector in future water scarcity crises. *Energy* 282, 128820. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2023.128820>.
- Loisel, J. und Gallego-Sala, A. (2022): Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Communications Earth & Environment* 3 (1), 208. <https://www.doi.org/10.1038/s43247-022-00547-x>.
- Lone, S. A., Jeelani, G., Deshpande, R. D., Mukherjee, A., Jasechko, S. und Lone, A. (2021): Meltwaters dominate groundwater recharge in cold arid desert of Upper Indus River Basin (UIRB), western Himalayas. *Science of The Total Environment* 786, 147514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147514>.
- Lötters-Viehof, S., Hilbrich, S., Berensmann, K., Artmann, G., Ashman, S., Herbold, T., Monti, A., Paffhausen, F., Roigk, S. und Steenkamp, L.-A. (2023): The Implementation of Sustainable Finance Taxonomies: Learning from South African Experiences. Bonn: German Institute of Development and Sustainability (IDOS). <https://doi.org/10.23661/ibp20.2023>.
- Love, H. (2024): Fostering inclusive and sustainable agricultural innovation in California's Central Valley. Washington, D.C.: Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/articles/fostering-inclusive-and-sustainable-agricultural-innovation-in-californias-central-valley/>, erschienen am 21.05.2024.
- Ludwig, F., van Slobbe, E. und Cofino, W. (2014): Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. *Journal of Hydrology* 518, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.010>.
- Lührmann, A. und Lindberg, S. I. (2019): A third wave of autocratization is here: what is new about it? *Democratization* 26 (7), 1095–1113. <https://www.doi.org/10.1080/13510347.2019.1582029>.
- Lukat, E., Lenschow, A., Dombrowsky, I., Meergans, F., Schütze, N., Stein, U. und Pahl-Wostl, C. (2023): Governance towards coordination for water resources management: The effect of governance modes. *Environmental Science & Policy* 141, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.12.016>.
- Lüthi, C., Willetts, J. und Hoffmann, S. (2020): Editorial: City-Wide Sanitation: The Urban Sustainability Challenge. *Frontiers in Environmental Science* 8, 585418. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.585418>.
- Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Shrestha, A. B. und Bierkens, M. F. P. (2014): Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change* 4 (7), 587–592. <https://www.doi.org/10.1038/nclimate2237>.
- Luukkonen, H. (2013): Vesiosuuskunnat, kuntien vesihuoltolaitokset ja kunnat. (Water cooperatives, municipal water utilities and municipalities). Helsinki: Kuntaliiton verkkojulkaisu.
- Lynch, A. J., Cooke, S. J., Arthington, A. H., Baigun, C., Bossenbroek, L., Dickens, C., Harrison, I., Kimirei, I., Langhans, S. D., Murchie, K. J., Olden, J. D., Ormerod, S. J., Owuor, M., Raghavan, R., Samways, M. J., Schinegger, R., Sharma, S., Tachamo-Shah, R. D., Tickner, D., Tweddle, D., Young, N. und Jähnig, S. C. (2023): People need freshwater biodiversity. *WIREs Water* 10 (3), e1633. <https://www.doi.org/10.1002/wat2.1633>.
- Madaka, H., Babbitt, C. W. und Ryen, E. G. (2022): Opportunities for reducing the supply chain water footprint of metals used in consumer electronics. *Resources, Conservation and Recycling* 176, 105926. <https://www.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105926>.
- Madhav, R. (2009): Law and policy reforms for irrigation. In: Cullet, P., Gowlland Gualtieri, A., Madhav, R. und Ramanathan, U. (Hrsg.): *Water Law for the Twenty-First Century. National and International Aspects of Water Law Reform in India*. London, New York: Taylor and Francis, 205–234.
- Mager, U. (2015): *International Water Law: Global Developments and Regional Examples*. Heidelberg: Jedermann-Verlag GmbH.
- Magilligan, F. J., Nislow, K. H., Dietrich, J. T., Doyle, H. und Kynard, B. (2021): Transient versus sustained biophysical responses to dam removal. *Geomorphology* 389, 107836. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107836>.
- Maharjan, A., McDowell, G., Pandey, A., Pasakhala, B., Shrestha, M. und Wang, X. (2023): Cryospheric change, adaptation, and sustainable development in the mountain societies of the Hindu Kush Himalaya. In: ICIMOD – International Centre for Integrated Mountain Development, Wester, P., Chaudhary, S., Chettri, N., Jackson, M., Maharjan, A., Nepal, S. und Steiner, J. F. (Hrsg.): *Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook*. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 165–217. <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1033>.
- Makate, C., Wang, R., Makate, M. und Mango, N. (2017): Impact of drought tolerant maize adoption on maize productivity, sales and consumption in rural Zimbabwe. *Agrekon* 56 (1), 67–81. <https://doi.org/10.1080/03031853.2017.1283241>.
- Makate, C. (2020): Local institutions and indigenous knowledge in adoption and scaling of climate-smart agricultural innovations among sub-Saharan smallholder farmers. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 12 (2), 270–287. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-07-2018-0055>.
- Maleki, S., Soffianian, A. R., Koupaei, S. S., Pourmanafi, S. und Saatchi, S. (2018): Wetland restoration prioritizing, a tool to reduce negative effects of drought; An application of multicriteria-spatial decision support system (MC-SDSS). *Ecological Engineering* 112, 132–139. <https://www.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.031>.
- Manteca Vilanova, X., De Briyne, N., Beaver, B. und Turner, P. V. (2019): Horse Welfare During Equine Chorionic Gonadotropin (eCG) Production. *Animals* 9 (12), 1053. <https://www.doi.org/10.3390/ani9121053x>.
- Markowska, J., Szalinska, W., Dabrowska, J. und Brzakala, M. (2020): The concept of a participatory approach to water management on a reservoir in response to wicked problems. *Journal of Environmental Management* 259, 109626. <https://www.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109626>.

- Maroufpoor, S., Bozorg-Haddad, O., Maroufpoor, E., Gerbens-Leenes, W., Loaiciga, H., Savic, D. und Singh, V. (2021): Optimal virtual water flows for improved food security in water-scarce countries. *Scientific Reports* 11, 1–18. <https://www.doi.org/10.1038/s41598-021-00500-6>.
- Marston, L., Konar, M., Cai, X. und Troy, T. J. (2015): Virtual groundwater transfers from overexploited aquifers in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (28), 8561–8566. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500457112>.
- Martens, H. R., Laage, K., Eickmanns, M., Drexler, A., Heinssohn, V., Wegner, N., Muster, C., Diekmann, M., Seeber, E., Kreyling, J., Michalik, P. und Tanneberger, F. (2023): Paludiculture can support biodiversity conservation in rewetted fen peatlands. *Scientific Reports* 13, 18091. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44481-0>.
- Martin-Ortega, J. (2023): We cannot address global water challenges without social sciences. *Nature Water* 1 (1), 2–3. <https://doi.org/10.1038/s44221-022-00013-0>.
- Martínez-Santos, P., De Stefano, L., Llamas, M. R. und Martínez-Alfaro, P. E. (2008): Wetland Restoration in the Mancha Occidental Aquifer, Spain: A Critical Perspective on Water, Agricultural, and Environmental Policies. *Restoration Ecology* 16 (3), 511–521. <https://www.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00410.x>.
- Martius, C., Froebrich, J. und Nuppenau, E.-A. (2009): Water Resource Management for Improving Environmental Security and Rural Livelihoods in the Irrigated Amu Darya Lowlands. In: Brauch, H. G., Spring, Ü. O., Grin, J., Mesjasz, C., Kameri-Mbote, P., Behera, N. C., Chourou, B. und Krummenacher, H. (Hrsg.): *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*. Berlin, Heidelberg: Springer, 749–761. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68488-6_57.
- Masood, N., Hudson-Edwards, K. und Farooqi, A. (2020): True cost of coal: Coal mining industry and its associated environmental impacts on water resource development. *Journal of Sustainable Mining* 19 (3), 1–17. <https://www.doi.org/10.46873/2300-3960.1012>.
- Matanzima, J. und Mosuo-Tsietse, T. (2023): Dam removal blind spots: debating the importance of community engagement in dam decommissioning projects. *Frontiers in Water* 5, 1–9. <https://www.doi.org/10.3389/frwa.2023.1286128>.
- Mathioudakis, V., Gerbens-Leenes, P. W., Van der Meer, T. H. und Hoekstra, A. Y. (2017): The water footprint of second-generation bioenergy: A comparison of biomass feedstocks and conversion techniques. *Journal of Cleaner Production* 148, 571–582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.032>.
- Maximilian, S., Alexandra, S., Josef, C., Susanne, B., Susanne, B. und Annette, P. (2023): Impact of Ambient Ultrafine Particles on Cause-Specific Mortality in Three German Cities. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 207 (10), 1334–1344. <https://www.doi.org/10.1164/rccm.202209-1837OC>.
- Mazhar, S., Pellegrini, E., Contini, M., Bravo, C. und De Nobili, M. (2022): Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils - A review. *Frontiers in Environmental Science* 10, 909415. <https://www.doi.org/10.3389/fenvs.2022.909415>.
- Mbengue, M. und Cima, E. (2023): „Giant Steps“: how technology is shaping international water law. In: Casado Pérez, V. und Larson, R. (Hrsg.): *A Research Agenda for International Water Law*. Cheltenham: Edward Elgar, 9–32. <https://www.e-elgar.com/shop/gbp/a-research-agenda-for-water-law-9781802204469.html>.
- McCaffrey, S. C. und Sinjela, M. (1998): The 1997 United Nations Convention on International Watercourses. *American Journal of International Law* 92 (1), 97–107. <https://www.doi.org/10.2307/2998069>.
- McDonald, R. I., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P. A., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., Balk, D., Boucher, T., Grill, G. und Montgomery, M. (2014): Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change* 27, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.022>.
- McGonigle, D. F., Harris, R. C., McCamphill, C., Kirk, S., Dils, R., Macdonald, J. und Bailey, S. (2012): Towards a more strategic approach to research to support catchment-based policy approaches to mitigate agricultural water pollution: A UK case-study. *Environmental Science & Policy* 24, 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.07.016>.
- McKinlay, R., Plant, J. A., Bell, J. N. B. und Voulvoulis, N. (2008): Endocrine disrupting pesticides: Implications for risk assessment. *Environment International* 34 (2), 168–183. <https://www.doi.org/10.1016/j.envint.2007.07.013>.
- Meehan, K., Mirumachi, N., Loftus, A. und Akhter, M. (2023): *Water: A Critical Introduction*. Hoboken (USA), Sussex (UK): John Wiley & Sons.
- Meinen-Dick, R. und Zwartveen, M. (1998): Gendered participation in water management: Issues and illustrations from water users' associations in South Asia. *Agriculture and Human Values* 15, 337–345. <https://doi.org/10.1023/A:1007533018254>.
- Meisch, S. P. (2019): I Want to Tell You a Story: How Narrative Water Ethics Contributes to Re-theorizing Water Politics. *Water* 11 (4), 631. <https://doi.org/10.3390/w11040631>.
- Mekonnen, M. M., Gerbens-Leenes, P. W. und Hoekstra, A. Y. (2015): The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research & Technology* 1 (3), 285–297. <https://www.doi.org/10.1039/c5ew00026b>.
- Mekonnen, M. M., Gerbens-Leenes, P. W. und Hoekstra, A. Y. (2016): Future electricity: The challenge of reducing both carbon and water footprint. *Sci Total Environ* 569–570, 1282–1288. <https://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.204>.
- Meldrum, J., Nettles-Anderson, S., Heath, G. und Macknick, J. (2013): Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environmental Research Letters* 8, 015031. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031>.
- Meli, P., Rey Benayas, J. M., Balvanera, P. und Martinez Ramos, M. (2014): Restoration enhances wetland biodiversity and ecosystem service supply, but results are context-dependent: a meta-analysis. *PLoS One* 9 (4), e93507. <https://www.doi.org/10.1371/journal.pone.0093507>.
- Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J., Stakhiv, E., Kucharski, J. und Gilroy, K. (2018): *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) - Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future*. Paris, Alexandria: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM).
- MEP Water Group und EESC – European Economic and Social Committee (2023): Call to Adopt an Ambitious EU Blue Deal. There is no Green without Blue! Brüssel: EU.
- Meran, G., Siehlow, M. und von Hirschhausen, C. (2021a): *Integrated Water Resource Management: Principles and Applications*. In: Meran, G., Siehlow, M. und von Hirschhausen, C. (Hrsg.): *The Economics of Water: Rules and Institutions*. Cham: Springer International Publishing, 23–121. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48485-9_3.
- Meran, G., Siehlow, M. und von Hirschhausen, C. (2021b): *The Economics of Water: Rules and Institutions*. Cham: Springer Nature. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-48485-9>.
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U. und Macdonald, E. (2021): Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (9), 592–609. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>.
- Messenger, M. L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., Tockner, K., Trautmann, T., Watt, C. und Datry, T. (2021): Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature* 594 (7863), 391–397. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>.
- Michalak, A. M., Xia, J., Brdjanovic, D., Mbiyozo, A.-N., Sedlak, D., Pradeep, T., Lall, U., Rao, N. und Gupta, J. (2023): The frontiers of water and sanitation. *Nature Water* 1 (1), 10–18. <https://doi.org/10.1038/s44221-022-00020-1>.

- Mie, A., Rudén, C. und Grandjean, P. (2018): Safety of Safety Evaluation of Pesticides: developmental neurotoxicity of chlorpyrifos and chlorpyrifos-methyl. *Environmental Health* 17 (1), 77. <https://www.doi.org/10.1186/s12940-018-0421-y>.
- Mielke, K., Schetter, C. und Wilde, A. (2011): Dimensions of social order: Empirical fact, analytical framework and boundary concept. Working Paper Series 78. Bonn: Center for Development Research, University of Bonn.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. und Stouffer, R. J. (2008): Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science* 319 (5863), 573–574. <https://www.doi.org/10.1126/science.1151915>.
- Minckley, T. A., Turner, D. S. und Weinstein, S. R. (2013): The relevance of wetland conservation in arid regions: A re-examination of vanishing communities in the American Southwest. *Journal of Arid Environments* 88, 213–221. <https://www.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.09.001>.
- Mirzabaei, A., Wu, J., Evans, J., García-Oliva, F., Hussein, I. A. G., Iqbal, M. H., Kimutai, J., Knowles, T., Meza, F., Nedjraoui, D., Tena, F., Türke-, M., Vázquez, R. J. und Welt, M. (2019): Desertification. In: Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M. und Malley, J. (Hrsg.): *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 249–344. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.005>.
- Mishra, A. K., Singh, J. und Mishra, P. P. (2023): Microplastics in freshwater ecosystem: A serious threat for freshwater environment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 20, 9189–9204. <https://www.doi.org/10.1007/s13762-022-04489-x>.
- Möckel, S., Gawel, E., Liess, M. und Neumeister, L. (2021): Pesticide tax in the EU – Various levy concepts and their impact. Leipzig: Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ). [https://www.ufz.de/export/data/global/257265_Study%20Pesticide-Taxes%20\(2021\).pdf](https://www.ufz.de/export/data/global/257265_Study%20Pesticide-Taxes%20(2021).pdf).
- Moellenkamp, S., Lamers, M., Huesmann, C., Rotter, S., Pahl-Wostl, C., Speil, K. und Pohl, W. (2010): Informal Participatory Platforms for Adaptive Management. Insights into Niche-finding, Collaborative Design and Outcomes from a Participatory Process in the Rhine Basin. *Ecology and Society* 15 (4), 41. <https://www.jstor.org/stable/26268234>.
- Mojiri, A., Zhou, J. L., Ohashi, A., Ozaki, N. und Kindaichi, T. (2019): Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments. *Science of The Total Environment* 696, 133971. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133971>.
- Molden, D. J., Shrestha, A. B., Immerzeel, W. W., Maharjan, A., Rasul, G., Wester, P., Wagle, N., Pradhananga, S. und Nepal, S. (2022): The Great Glacier and Snow-Dependent Rivers of Asia and Climate Change: Heading for Troubled Waters. In: Biswas, A. K. und Tortajada, C. (Hrsg.): *Water Security Under Climate Change*. Singapore: Springer Singapore, 223–250. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_12.
- Molle, F. (2009): River-basin planning and management: The social life of a concept. *Geoforum* 40 (3), 484–494. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.03.004>.
- Mollinga, P. P., Dixit, A. und Athukorala, K. (2006) (Hrsg.): *Integrated Water Resources Management: Global Theory, Emerging Practice and Local Needs*. New Delhi: SAGE India.
- Money, A. (2018): A Typology of Water Infrastructure Investors. WWC White Paper. Marseille: World Water Council (WWC).
- Money, A. (2022): Blended Finance in the Water Sector: Challenges and Attributes. Marseille: World Water Council (WWC).
- Mora, C., McKenzie, T., Gaw, I. M., Dean, J. M., von Hammerstein, H., Knudson, T. A., Setter, R. O., Smith, C. Z., Webster, K. M., Patz, J. A. und Franklin, E. C. (2022): Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change* 12 (9), 869–875. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1>.
- Morgan Stanley (2023): 4 Ways to Invest in a Sustainable 'Blue Economy'. New York: Morgan Stanley. <https://www.morganstanley.com/ideas/blue-economy-investing-ocean-priorities>, erschienen am 11.04.2023.
- Morin, J.-F. (2019): TRade and ENvironment Database (TREND) 2.0. Codebook. Quebec City, Canada: Canada Research Chair in International Political Economy Université Laval. <https://www.chaire-epi.ulaval.ca/en/trend>.
- Mormina, M. (2019): Science, Technology and Innovation as Social Goods for Development: Rethinking Research Capacity Building from Sen's Capabilities Approach. *Science and Engineering Ethics* 25 (3), 671–692. <https://www.doi.org/10.1007/s11948-018-0037-1>.
- Moss, T. M., Will, Guy, Simon; Marvin, Simon (2009): Organising Water: The Hidden Role of Intermediary Work. *Water Alternatives* 2 (1), 16–33. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/volume2/v2issue1/35-a2-1-2>.
- Mostert, E., Pahl-Wostl, C., Rees, Y., Searle, B., Tàbara, D. und Tippet, J. (2007): Social learning in European river-basin management: barriers and fostering mechanisms from 10 river basins. *Ecology and society* 12 (1), 19. <https://www.jstor.org/stable/26267838>.
- MRC – Mekong River Commission (2001): Procedures for Data and Information Exchange and Sharing (PDIES). Phnom Penh, Kambodscha: MRC. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mul212072.pdf>.
- MRC – Mekong River Commission (2021a): Basin Development Strategy for the Mekong River Basin 2021–2030 & MRC Strategic Plan 2021–2025. Phnom Penh, Kambodscha: MRC. https://reliefweb.int/attachments/ab08eed2-d948-31c2-988f-3143c2520108/BDP-2021-2030-SP-2021-2025_Final.pdf.
- MRC – Mekong River Commission (2021b): Technical Guidelines on the Implementation of the Procedures for Water Quality. Phnom Penh, Kambodscha: MRC.
- MRC – Mekong River Commission (2023): Guidelines for Transboundary Environmental Impact Assessment in the Lower Mekong River Basin (TbEIA). Phnom Penh, Kambodscha: MRC.
- Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O. und Christensen, P. (2021): Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* 14, 6099–6121. <https://www.doi.org/10.1039/d1ee00691f>.
- Mukherjee, K. (2022): Water crisis: a case of Chennai. *Journal of Sustainable Science and Transformative Research-Reviews & Letters* 1 (2), 39–43.
- Müller, S. (2000): Von der Mangel- zur Marktwirtschaft: Analyse der Konsumbedingungen und des Kosumverhaltens in der DDR. Leipzig: Institut für Marktforschung.
- Mustapha, J. (2016): La gestion de l'eau agricole par les Associations d'Usagers de l'Eau Agricole (AUEA) et les questions de développement durable: Cas de l'oasis de Mezguita au Maroc. *Dossiers de Recherches en Économie et Gestion* 5 (1), 47–74. <https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/doreg-v5i1.15225>.
- NABU – Naturschutzbund Deutschland (2024): ANK – Warum trotz Klimakrise und Hochwasser schon wieder Kürzungen drohen. Berlin: NABU. <https://blogs.nabu.de/naturschaetze-retten/ank/>, erschienen am 11.06.2024.
- Namdar, R., Karami, E. und Keshavarz, M. (2021): Climate Change and Vulnerability: The Case of MENA Countries. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10 (11), 794. <https://www.doi.org/10.3390/ijgi10110794>.
- Namgay, K., Millar, J. E., Black, R. S. und Samdup, T. (2014): Changes in Transhumant Agro-pastoralism in Bhutan: A Disappearing Livelihood? *Human Ecology* 42 (5), 779–792. <https://doi.org/10.1007/s10745-014-9684-2>.

- NAP Global Network (2020): The National Adaptation Plan (NAP) Process: Frequently Asked Questions. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development (IISD). <https://napglobalnetwork.org/2019/12/the-national-adaptation-plan-nap-process-frequently-asked-questions/>.
- Narayan, A. S., Marks, S. J., Meierhofer, R., Strande, L., Tilley, E., Zurbrügg, C. und Lüthi, C. (2021): Advancements in and integration of water, sanitation, and solid waste for low- and middle-income countries. *Annual review of environment and resources* 46, 193–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030620-042304>.
- Nathanson, J. A. (2023): The Pollution Problem. Edinburgh: Encyclopædia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/explore/savingearth/pollution-overview>, abgerufen am 7.11.2023.
- Naturpark NLH – Naturpark Niederlausitzer Heide- und Kulturlandschaft (2024): Landschaftswandel im Auftrag der Wissenschaft. Bad Liebenwerda: Naturpark NLH. <https://naturpark-nlh.de/lasswissen>, abgerufen am 10.05.2024.
- Naughten, K. A., Holland, P. R. und De Rydt, J. (2023): Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change* 13 (11), 1222–1228. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x>.
- Neef, C., Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt: IMPULS Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik.
- Negrello, M. (2022): Designing with Nature Climate-Resilient Cities: A Lesson from Copenhagen. In: Arbizzani, E., Cangelli, E., Clemente, C., Cumo, F., Giofrè, F., Giovenale, A. M., Palme, M. und Paris, S. (Hrsg.): *International Conference on Technological Imagination in the Green and Digital Transition*. Cham: Springer, 853–862. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7_76.
- Nepal, S., Steiner, J. F., Allen, S., Azam, M. F., Bhuchar, S., Bismans, H., Dhakal, M., Khanal, S., Li, D., Lutz, A., Pradhananga, S., Ritzema, R., Stoffel, M. und Stuart-Smith, R. (2023): Consequences of cryospheric change for water resources and hazards in the Hindu Kush Himalaya. In: ICIMOD – International Centre for Integrated Mountain Development, Wester, P., Chaudhary, S., Chettri, N., Jackson, M., Maharjan, A., Nepal, S. und Steiner, J. F. (Hrsg.): *Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook*. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 73–121. <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1031>.
- Nhim, T. und Richter, A. (2022): Path dependencies and institutional traps in water governance-Evidence from Cambodia. *Ecological Economics* 196, 107391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107391>.
- Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K. und Chen, X. (2021): Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (2), 91–106. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>.
- Nie, Y., Deng, Q., Pritchard, H. D., Carrivick, J. L., Ahmed, F., Huggel, C., Liu, L., Wang, W., Lesi, M., Wang, J., Zhang, H., Zhang, B., Lu, Q. und Zhang, Y. (2023): Glacial lake outburst floods threaten Asia's infrastructure. *Science Bulletin* 68 (13), 1361–1365. <https://www.doi.org/10.1016/j.scib.2023.05.035>.
- Nielsen, H. Ø., Konrad, M. T. H., Pedersen, A. B. und Gyldenkerne, S. (2023): Ex-post evaluation of the Danish pesticide tax: A novel and effective tax design. *Land Use Policy* 126, 106549. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106549>.
- Niemeijer, D., Puigdefabregas, J., White, R., Lal, R., Winslow, M., Ziedler, J., Prince, S., Archer, E. und King, C. (2005): *Dryland Systems*. In: Hassan, R., Scholes, R. und Ash, N. (Hrsg.): *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*, Volume 1. Washington, DC: Island Press, 623–662.
- Nijens, J., Behrens, P., Kraan, O., Sprecher, B. und Kleijn, R. (2023): Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system. *Joule* 7 (11), 2408–2413. <https://www.doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>.
- Nolan, R. H., Anderson, L. O., Poulter, B. und Varner, J. M. (2022): Increasing threat of wildfires: the year 2020 in perspective: A Global Ecology and Biogeography special issue. *Global Ecology and Biogeography* 31 (10), 1898–1905. <https://doi.org/10.1111/geb.13588>.
- Nord, M., Lundstedt, M., Altman, D., Angiolillo, F., Borella, C., Fernandes, T., Gastaldi, L., Good God, A., Natsika, N. und Lindberg, S. I. (2024): *Democracy Report 2024: Democracy Winning and Losing at the Ballot*. Göteborg, Schweden: Varieties of Democracy Institute (V-Dem).
- North, D. C. (1991): Institutions. *Journal of economic perspectives* 5 (1), 97–112. <https://www.doi.org/10.1257/jep.5.1.97>.
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Werner, T. T., Jowitt, S. M., Haque, N., Yellishetty, M. und Weng, Z. (2017): The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change* 44, 109–124. <https://www.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>.
- Nouredine, G., Eslamian, S. und Katlane, R. (2021): Integrated Water Resources Management and Climate Change. *International Journal Water Sciences and Environment Technologies* 1 (1), 89–103.
- Nowack, D. und Leininger, J. (2022): Protecting democracy from abroad: democracy aid against attempts to circumvent presidential term limits. *Democratization* 29 (1), 154–173. <https://www.doi.org/10.1080/13510347.2021.1957840>.
- NRW.Bank – Förderbank für Nordrhein-Westfalen (2024): *Grüne Emscher-Lippe*. Düsseldorf: NRW.Bank. <https://www.nrwbank.de/de/foerderung/foerderprodukte/60014/nrwbank-gruene-emscher-lippe.html>, abgerufen am 16.05.2024.
- NWB Bank – Nederlandse Waterschapsbank (2024): About NWB Bank. NWB Bank: dedicated, committed and reliable. Den Haag: NWB Bank. <https://nwbbank.com/en/about-nwb-bank>, abgerufen am 1.06.2024.
- Oaks, J. L., Gilbert, M., Virani, M. Z., Watson, R. T., Meteyer, C. U., Rideout, B. A., Shivaprasad, H. L., Ahmed, S., Iqbal Chaudhry, M. J., Arshad, M., Mahmood, S., Ali, A. und Ahmed Khan, A. (2004): Diclofenac residues as the cause of vulture population decline in Pakistan. *Nature* 427, 630–633. <https://www.doi.org/10.1038/nature02317>.
- Obasi, P. N. und Akudinobi, B. B. (2020): Potential health risk and levels of heavy metals in water resources of lead-zinc mining communities of Abakaliki, southeast Nigeria. *Applied Water Science* 10, 184. <https://www.doi.org/10.1007/s13201-020-01233-z>.
- Oberhauser, D., Hägele, R. und Dombrowsky, I. (2023): Unravelling hidden factors explaining competition for and overuse of groundwater in Azraq, Jordan: digging deeper into a network of action situations. *Sustainability Science* 18 (1), 235–249. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01135-w>.
- Oberkircher, L. und Hornidge, A.-K. (2011): “Water Is Life” – Farmer Rationales and Water Saving in Khorezm, Uzbekistan: A Lifeworld Analysis. *Rural Sociology* 76 (3), 394–421. <https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.2011.00054.x>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development und WEF – World Economic Forum (2015): *Blended Finance Vol. 1: A Primer for Development Finance and Philanthropic Funders: An overview of the strategic use of development finance and philanthropic funds to mobilize private capital for development*. Genf: WEF.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2018): *International experience with water abstraction and pollution charge*. In: OECD (Hrsg.): *Facilitating the Reform of Economic Instruments for Water Management in Georgia*. Paris: OECD, 81–86. <https://doi.org/10.1787/9789264281776-10-en>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2019a): *Making Blended Finance Work for Water and Sanitation: Unlocking Commercial Finance for SDG 6 – Policy Highlights*. Paris: OECD.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2019b): *Trade and the environment*. Paris: OECD. https://issuu.com/oecd.publishing/docs/trade_and_the_environment.

- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2021): Toolkit for Water Policies and Governance: Converging Towards the OECD Council Recommendation on Water. Paris: OECD. <https://doi.org/10.1787/ed1a7936-en>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2022a): Financing a Water Secure Future. OECD Studies on Water. Paris: OECD. <https://doi.org/10.1787/a2ecb261-en>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2022b): Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. Paris: OECD. <https://www.doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2024): Recommendation of the Council on Countering the Illegal Trade of Pesticides. OECD/LEGAL/0446. Paris: OECD.
- Oladele, O. I. und Amara, A. (2024): Farmers' use of Indigenous knowledge on climate change adaptation across farming systems and agroecological zones of Sierra Leone. *AlterNative: An International Journal of Indigenous Peoples* 0 (0), 1–11. <https://www.doi.org/10.1177/11771801241251862>.
- OÖ Wasser – OÖ Wasser Genossenschaftsverband (2024a): Wassergenossenschaft: Ziel einer Wassergenossenschaft. Linz: OÖ Wasser. <https://www.oewasser.at/de/genossenschaften.html>, abgerufen am 7.02.2024.
- OÖ Wasser – OÖ Wasser Genossenschaftsverband (2024b): Daten zur Wassergenossenschaft Gramastetten. Linz: OÖ Wasser. <https://www.oewasser.at/de/wassergenossenschaft/wasser/genossenschaft.gramastetten.html>, abgerufen am 5.03.2024.
- Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., CifuentesJara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B. und Sebesvari, Z. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. und Weyer, N. M. (Hrsg.): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 321–445. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>.
- Osofsky, S. A. und Pongsiri, M. J. (2018): Operationalising planetary health as a game-changing paradigm: health impact assessments are key. *The Lancet Planetary Health* 2 (2), e54–e55. [https://www.doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30183-3](https://www.doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30183-3).
- Ostrom, E. und Gardner, R. (1993): Coping with Asymmetries in the Commons: Self-Governing Irrigation Systems Can Work. *Journal of Economic Perspectives* 7 (4), 93–112. <https://www.doi.org/10.1257/jep.7.4.93>.
- Our World in Data (2023): The global Multidimensional Poverty Index (MPI) 2023. Oxford: Our World in Data, University of Oxford. <https://ourworldindata.org/grapher/share-multi-poverty>, abgerufen am 4.07.2024.
- Ozment, S. und Feltran-Barbieri, R. (2018): Help for São Paulo's Complex Water Woes: Protect and Restore Forests. Washington, D.C.: World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/insights/help-sao-paulos-complex-water-woes-protect-and-restore-forests>, erschienen am 25.09.2018.
- Pacific Institute (2023): Water Conflict Chronology. Oakland: Pacific Institute. <https://www.worldwater.org/conflict/list/>, abgerufen am 17.02.2024.
- Pahl-Wostl, C., Isendahl, N., Möllenkamp, S., Brugnach, M., Jeffrey, P., Medema, W. und Tessa de Vries, T. (2006): Paradigms in Water Management. Deliverable No. 1.12. Osnabrück: NeWater project.
- Pahl-Wostl, C. (2007): Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water resources management* 21, 49–62. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9040-4>.
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D. und Taillieu, T. (2007): Social learning and water resources management. *Ecology and society* 12 (2), 5. <http://www.jstor.org/stable/26267868>.
- Pahl-Wostl, C. (2008): Requirements for adaptive water management. In: Pahl-Wostl, C., Kabat, P. und Möltgen, J. (Hrsg.): Adaptive and integrated water management: Coping with complexity and uncertainty. Berlin, Heidelberg: Springer, 1–22. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75941-6_1.
- Pahl-Wostl, C. (2019): Governance of the water-energy-food security nexus: A multi-level coordination challenge. *Environmental Science & Policy* 92, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.017>.
- Pahl-Wostl, C. und Knieper, C. (2023): Pathways towards improved water governance: The role of polycentric governance systems and vertical and horizontal coordination. *Environmental Science & Policy* 144, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.011>.
- Paisley, K., Weiler, P. und Henshaw, T. (2016): Trans-boundary water governance through the prism of the Mekong River Basin. In: Gray, J., Holley, C. und Rayfuse, R. (Hrsg.): Trans-jurisdictional Water Law and Governance. London: Routledge, 43–61.
- Pandit, M. K. und Grumbine, R. E. (2012): Potential effects of ongoing and proposed hydropower development on terrestrial biological diversity in the Indian Himalaya. *Conserv Biol* 26 (6), 1061–1071. <https://www.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01918.x>.
- Pannke, D., Schwan, G., Gerards Iglesias, L., Krabbe, J. und Sabo, K. (2024): Kommunalen Entwicklungsbeirat - Konzept und Praxis. Berlin: Governance Plattform. <https://www.governance-platform.org/publikation-entwicklungsbeiräte/>.
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., Trisurat, Y., Adrian, R., Anshari, G. Z., Arneth, A., Gao, Q., Gonzalez, P., Harris, R., Price, J., Stevens, N. und Talukdar, G. H. (2022): Terrestrial and Freshwater Ecosystems and their Services. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. und Rama, B. (Hrsg.): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 197–377. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.004>.
- Pascale, S., Kapnick, S. B., Delworth, T. L. und Cooke, W. F. (2020): Increasing risk of another Cape Town “Day Zero” drought in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (47), 29495–29503. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009144117>.
- Paszkiwicz, M., Godlewska, K., Lis, H., Caban, M., Białk-Bielińska, A. und Stepnowski, P. (2022): Advances in suspect screening and non-target analysis of polar emerging contaminants in the environmental monitoring. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 154, 116671. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116671>.
- Paton, E., Kluge, B. und Nehls, T. (2021): Ein Reallabor für die wassersensible Stadtentwicklung. Projektbericht Hydrologische Notizen. *Hydrologie und Wasserwirtschaft* 65 (H3), 126–131.
- Pattberg, P. und Widerberg, O. (2015): Global environmental governance. In: Pattberg, P. und Zelli, F. (Hrsg.): Encyclopedia of Global Environmental Governance and Politics. Cheltenham: Edward Elgar, 28–35.
- Paul, E., Bessi re, Y., Dumas, C. und Girbal-Neuhauser, E. (2021): Biopolymers Production from Wastes and Wastewaters by Mixed Microbial Cultures: Strategies for Microbial Selection. *Waste Biomass Valor* 12, 4213–4237. <https://www.doi.org/10.1007/s12649-020-01252-6>.
- Payne, J., Connor, R. und Chaves Pacheco, S. M. (2024): Energy. In: Nations, U. (Hrsg.): The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO, 61–72.
- PCA – Permanent Court of Arbitration (2023): PCA Press Release: Proceedings under the Indus Waters Treat (PCA Case No. 2023-01). Den Haag: PCA. <https://pca-cpa.org/en/news/pca-press-release-pca-case-no-2023-01-proceedings-under-the-indus-waters-treat/>, erschienen am 6.07.2023.

- Pech, G. T., Araujo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengard, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H. I., Martin, V. Y., McCormack, P. C., McDonald, J., Mitchell, N. J., Mustonen, T., Pandolfi, J. M., Pettorelli, N., Popova, E., Robinson, S. A., Scheffers, B. R., Shaw, J. D., Sorte, C. J., Strugnell, J. M., Sunday, J. M., Tuanmu, M. N., Verges, A., Villanueva, C., Wernberg, T., Wapstra, E. und Williams, S. E. (2017): Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355 (6332), 1–9. <https://www.doi.org/10.1126/science.aai9214>.
- Peer, R. A. und Chini, C. M. (2020): An integrated assessment of the global virtual water trade network of energy. *Environmental Research Letters* 15 (11), 114015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbbb0>.
- Pereira, L. B., Sad, C. M. S., Castro, E. V. R., Filgueiras, P. R. und Lacerda Jr., V. (2022): Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel* 310, 122301. <https://www.doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301>.
- Perry, C., Steduto, P. und Karajeh, F. (2017): Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. Discussion paper on irrigation and sustainable water resources management in the Near East and North Africa. Kairo: Food and Agriculture Organization (FAO).
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hasselöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Sogaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z. und Hauschild, M. Z. (2022): Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environmental Science & Technology* 56 (3), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>.
- Pesa, I. (2021): Between waste and profit: Environmental values on the Central African Copperbelt. *The Extractive Industries and Society* 8 (4), 100793. <https://www.doi.org/10.1016/j.exis.2020.08.004>.
- Petersen, N. (2024): §7 Laufende Besteuerung. In: Haase, F. und Jachmann-Michel, M. (Hrsg.): *Beck'sches Handbuch Immobiliensteuerrecht*. München: C.H. Beck, Rn. 306–309.
- Petersen, T. und Klauer, B. (2014): Öffentlichkeitsbeteiligung, Partizipation und Verantwortung des Staates in der Umweltpolitik. Leipzig: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ).
- Pfister, S., Boulay, A.-M., Berger, M., Hadjikakou, M., Motoshita, M., Hess, T., Ridoutt, B., Weinzettel, J., Scherer, L., Döll, P., Manzardo, A., Núñez, M., Veronesi, F., Humbert, S., Buxmann, K., Harding, K., Benini, L., Oki, T., Finkbeiner, M. und Henderson, A. (2017): Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA". *Ecological Indicators* 72, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.051>.
- Pierce, G., Chow, N. und DeShazo, J. (2020): The case for state-level drinking water affordability programs: Conceptual and empirical evidence from California. *Utilities Policy* 63, 101006. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101006>.
- Pierson, P. (2000): Increasing returns, path dependence, and the study of politics. *American Political Science Review* 94 (2), 251–267. <https://www.doi.org/10.2307/2586011>.
- Pietilä, P., Katko, T. und Arvonen, V. (2020): Role of Water Cooperatives in Water Service Production - Lessons from Finland and Denmark. Tampere, Finnland: CIB World Building Congress.
- Polazzo, F., Roth, S. K., Hermann, M., Mangold-Döring, A., Rico, A., Sobek, A., Van den Brink, P. J. und Jackson, M. C. (2022): Combined effects of heatwaves and micropollutants on freshwater ecosystems: Towards an integrated assessment of extreme events in multiple stressors research. *Global Change Biology* 28 (4), 1248–1267. <https://www.doi.org/10.1111/gcb.15971>.
- Polvi, L. E. und Sarneel, J. M. (2017): Ecosystem engineers in rivers: An introduction to how and where organisms create positive biogeomorphic feedbacks. *WIREs Water* 5 (2), e1271. <https://www.doi.org/10.1002/wat2.1271>.
- Pörtner, H.-O., Karl, D. M., Boyd, P. W., Cheung, W. W. L., Lluich-Cota, S. E., Nojiri, Y., Schmidt, D. N. und Zavialov, P. O. (2014): Ocean Systems. In: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. und White, L. L. (Hrsg.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 411–484.
- Posthuma, L., Brack, W., van Gils, J., Focks, A., Müller, C., de Zwart, D. und Birk, S. (2019): Mixtures of chemicals are important drivers of impacts on ecological status in European surface waters. *Environmental Sciences Europe* 31 (71), 1–7. <https://www.doi.org/10.1186/s12302-019-0247-4>.
- PPIC – Public Policy Institute of California (2018): California's Water. San Francisco, Kalifornien: PPIC. <https://www.ppic.org/wp-content/uploads/californias-water-november-2018.pdf>.
- PSF – Platform on Sustainable Finance (2024): A Compendium of Market Practices, How the EU's Taxonomy and sustainable finance framework are helping financial and non-financial actors transition to net zero. Brüssel: EU. https://finance.ec.europa.eu/document/download/ff44591e-9d83-4027-a079-f3fe23bbaf41_en?filename=240129-sf-platform-report-market-practices-compendium-report_en.pdf.
- Pulido-Velazquez, M., Marcos-Garcia, P., Girard, C., Sanchis-Ibor, C., Martinez-Capel, F., García-Prats, A., Ortega-Reig, M., García-Mollá, M. und Rinaudo, J. D. (2022): A Top-Down Meets Bottom-Up Approach for Climate Change Adaptation in Water Resource Systems. In: Kondrup, C., Mercoglian, P., Bosello, F., Mysiak, J., Scoccimarro, E., Rizzo, A., Ebrey, R., Ruiter, M. d., Jeuken, A. und Watkiss, P. (Hrsg.): *Climate Adaptation Modelling*. Cham: Springer International Publishing, 149–157. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4_18.
- Qin, Y. und Gartner, T. (2016): Watersheds Lost Up to 22% of Their Forests in 14 Years. Here's How it Affects Your Water Supply. Washington, D.C.: Global Forest Watch (GFW). <https://www.globalforestwatch.org/blog/forest-insights/watersheds-lost-up-to-22-of-their-forests-in-14-years-heres-how-it-affects-your-water-supply/>, erschienen am 30.08.2016.
- Quijano-Baron, J., Carlier, R., Rodriguez, J. F., Sandi, S. G., Saco, P. M., Wen, L. und Kuczera, G. (2022): And we thought the Millennium Drought was bad: Assessing climate variability and change impacts on an Australian dryland wetland using an ecohydrologic emulator. *Water Research* 218, 118487. <https://www.doi.org/10.1016/j.watres.2022.118487>.
- Raabe, D. (2023): The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys. *Chemical Reviews* 123 (5), 2436–2608. <https://www.doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>.
- Rahut, D. B. und Ali, A. (2017): Coping with climate change and its impact on productivity, income, and poverty: Evidence from the Himalayan region of Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 24, 515–525. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.05.006>.
- Ramsar Convention on Wetlands (2018): *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Service to People*. Gland, Schweiz: Ramsar Convention Secretariat.
- Randell, H. und Gray, C. (2019): Climate change and educational attainment in the global tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (18), 8840–8845. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817480116>.
- Ranjan, N., Singh, P. K. und Maurya, N. S. (2022): Pharmaceuticals in water as emerging pollutants for river health: A critical review under Indian conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 247, 114220. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114220>.
- Raskin, P. G., Peter, Kirshen, Paul; Pontius, Gil; Strzepek, Kenneth (1997): *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Water Futures: Assessment of long-range Patterns and Problems*. Stockholm: Stockholm Environment Institute.

- Rasul, G. und Molden, D. (2019): The Global Social and Economic Consequences of Mountain Cryospheric Change. *Frontiers in Environmental Science* 7, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091>.
- Ray, P. A. und Brown, C. M. (2015): *Confronting climate uncertainty in water resources planning and project design: The decision tree framework*. Washington, D.C.: World Bank Publications.
- Reckien, D., Magnan, A. K., Singh, C., Lukas-Sithole, M., Orlove, B., Schipper, E. L. F. und Coughlan de Perez, E. (2023): Navigating the continuum between adaptation and maladaptation. *Nature Climate Change* 13 (9), 907–918. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01774-6>.
- Redonda, A., von Haldenwang, C. und Aliu, F. (2021): Tax expenditure reporting and domestic revenue mobilization in Africa. In: Mosquera Valderrama, I. J., Lesage, D. und Lips, W. (Hrsg.): *Taxation, International Cooperation and the 2030 Sustainable Development Agenda*. Band 19. Cham: Springer, 173–193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64857-2_9.
- Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I. und Akash, M. S. H. (2018): Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry* 119 (1), 157–184. <https://www.doi.org/10.1002/jcb.26234>.
- Reichhuber, A., Svoboda, M., King-Okumu, C., Mirzabaev, A., Vicente-Serrano, S. M., Srinivasan, R., Ehlert, K., Jia, X., Karnib, A., Lal, R., Mislinsheeva, B., Ravindranath, N. H., López Santos, A., Schipper, L., Stefanski, R., Vukovi, A. und Zhang, H. (2022): Multiscale Approaches for the Assessment and Monitoring of Social and Ecological Resilience to Drought. A Report of the Science-Policy Interface. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T. J., Kidd, K. A., MacCormack, T. J., Olden, J. D., Ormerod, S. J., Smol, J. P., Taylor, W. W., Tockner, K., Vermaire, J. C., Dudgeon, D. und Cooke, S. J. (2019): Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 94 (3), 849–873. <https://www.doi.org/10.1111/brv.12480>.
- Rice, J. und Westerhoff, P. (2015): Spatial and Temporal Variation in De Facto Wastewater Reuse in Drinking Water Systems across the U.S.A. *Environmental Science & Technology* 49 (2), 982–989. <https://www.doi.org/10.1021/es5048057>.
- Richardson, C. J., Reiss, P., Hussain, N. A., Alwash, A. J. und Pool, D. J. (2005): The restoration potential of the Mesopotamian marshes of Iraq. *Science* 307 (5713), 1307–1311. <https://www.doi.org/10.1126/science.1105750>.
- Richardson, J. R., Fitsanakis, V., Westerink, R. H. S. und Kanthasamy, A. G. (2019): Neurotoxicity of pesticides. *Acta Neuropathologica* 138 (3), 343–362. <https://www.doi.org/10.1007/s00401-019-02033-9>.
- Rieckmann, M. (2020): Bildung für nachhaltige Entwicklung zum Thema „Verfügbarkeit und nachhaltige Nutzung von Wasser“. In: Wulfmeyer, M. (Hrsg.): *Bildung für nachhaltige Entwicklung im Sachunterricht: Grundlagen und Praxisbeispiele*. Basiswissen Grundschule. Band 43. Baltmannsweiler: Schneider Hohengehren, 105–116.
- Rimmert, M., Baudoin, L., Cotta, B., Kochskämper, E. und Newig, J. (2020): Participation in river basin planning under the water framework directive - Has it benefitted good water status? *Water Alternatives* 13 (3), 484–512. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/volume-13/issue-3-1/589-a13-3-7>.
- Ringersma, J., Batjes, N. und Dent, D. (2003): *Green Water: definitions and data for assessment*. Report 2003/2. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Ripl, W. (2003): *Water: the bloodstream of the biosphere*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 358 (1440), 1921–1934. <https://www.doi.org/10.1098/rstb.2003.1378>.
- Ritchie, H. und Roser, M. (2017): *Water Use and Stress*. Oxford: Our World in Data, University of Oxford. <https://ourworldindata.org/water-use-stress>, erschienen am 1.07.2018.
- Ritchie, H., Rosado, P. und Roser, M. (2023): *Data Page: Share of electricity generated by hydropower*. Oxford: Our World in Data, University of Oxford. <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-hydro>, abgerufen am 7.12.2023.
- Ritchie, H., Spooner, F. und Roser, M. (2024): *Clean Water. Clean and safe water is essential for good health. How did access change over time? Where do people lack access?* Oxford: Our World in Data, University of Oxford. <https://ourworldindata.org/clean-water>, abgerufen am 4.07.2024.
- Ritson, J. P., Bell, M., Brazier, R. E., Grand-Clement, E., Graham, N. J. D., Freeman, C., Smith, D., Templeton, M. R. und Clark, J. M. (2016): Managing peatland vegetation for drinking water treatment. *Scientific Reports* 6 (1), 36751. <https://www.doi.org/10.1038/srep36751>.
- Ritzema, H., Limin, S., Kusin, K., Jauhiainen, J. und Wösten, H. (2014): Canal blocking strategies for hydrological restoration of degraded tropical peatlands in Central Kalimantan, Indonesia. *Catena* 114, 11–20. <https://www.doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.009>.
- Rivera-Dávila, O. L., Sánchez-Martínez, G. und Rico-Martínez, R. (2021): Ecotoxicity of pesticides and semiochemicals used for control and prevention of conifer bark beetle (*Dendroctonus* spp.) outbreaks. *Chemosphere* 263, 128375. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128375>.
- Robock, A. (2003): *HYDROLOGY. Soil Moisture*. In: Holton, J. R. (Hrsg.): *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Oxford: Academic Press, 987–993. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00169-X>.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C. und Schellnhuber, H. J. (2009a): A safe operating space for humanity. *nature* 461 (7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C. und Schellnhuber, H. J. (2009b): Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society* 14 (2), 32. <https://www.jstor.org/stable/26268316>.
- Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., Lade, S. J., Abrams, J. F., Andersen, L. S., Armstrong McKay, D. I., Bai, X., Bala, G., Bunn, S. E., Ciobanu, D., DeClerck, F., Ebi, K., Gifford, L., Gordon, C., Hasan, S., Kanie, N., Lenton, T. M., Loriani, S., Liverman, D. M., Mohamed, A., Nakicenovic, N., Obura, D., Ospina, D., Prodani, K., Rammelt, C., Sakschewski, B., Scholtens, J., Stewart-Koster, B., Tharammal, T., van Vuuren, D., Verburg, P. H., Winkelmann, R., Zimm, C., Bennett, E. M., Bringezu, S., Broadgate, W., Green, P. A., Huang, L., Jacobson, L., Ndehedehe, C., Pedde, S., Rocha, J., Scheffer, M., Schulte-Uebbing, L., de Vries, W., Xiao, C., Xu, C., Xu, X., Zafra-Calvo, N. und Zhang, X. (2023a): Safe and just Earth system boundaries. *Nature* 619 (7968), 102–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>.
- Rockström, J., Mazzucato, M., Andersen, L. S., Fahrlander, S. F. und Gerten, D. (2023b): Why we need a new economics of water as a common good. *Nature* 615, 794–797. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00800-z>.
- Rockström, J., Kotze, L., Milutinovic, S., Biermann, F., Brovkin, V., Donges, J., Ebbesson, J., French, D., Gupta, J., Kim, R., Lenton, T., Lenzi, D., Nakicenovic, N., Neumann, B., Schuppert, F., Winkelmann, R., Bosselmann, K., Folke, C., Lucht, W., Schlosberg, D., Richardson, K. und Steffen, W. (2024): The planetary commons: A new paradigm for safeguarding Earth-regulating systems in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 121 (5), e2301531121. <https://www.doi.org/10.1073/pnas.2301531121>.
- Rogers, B. C., Dunn, G., Hammer, K., Novalia, W., de Haan, F. J., Brown, L., Brown, R. R., Lloyd, S., Ulrich, C., Wong, T. H. F. und Chesterfield, C. (2020): *Water Sensitive Cities Index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions*. *Water Research* 186, 116411. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116411>.

- Rohling, E. J., Hibbert, F. D., Grant, K. M., Galaasen, E. V., Irvani, N., Kleiven, H. F., Marino, G., Ninnemann, U., Roberts, A. P., Rosenthal, Y., Schulz, H., Williams, F. H. und Yu, J. (2019): Asynchronous Antarctic and Greenland ice-volume contributions to the last interglacial sea-level highstand. *Nat Commun* 10 (1), 5040. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-019-12874-3>.
- Rollins-Smith, L. A. und Le Sage, E. H. (2023): Heat stress and amphibian immunity in a time of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 378 (1882), 20220132. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0132>.
- Romanello, M., Napoli, C. d., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Walawender, M., Ali, Z., Ameli, N., Ayeb-Karlsson, S., Beggs, P. J., Belesova, K., Berrang Ford, L., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cross, T. J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Dominguez-Salas, P., Dubrow, R., Ebi, K. L., Eckelman, M., Ekins, P., Freyberg, C., Gasparyan, O., Gordon-Strachan, G., Graham, H., Gunther, S. H., Hamilton, I., Hang, Y., Hänninen, R., Hartinger, S., He, K., Heidecke, J., Hess, J. J., Hsu, S.-C., Jamart, L., Jankin, S., Jay, O., Kelman, I., Kieseewetter, G., Kinney, P., Kniveton, D., Kouznetsov, R., Larosa, F., Lee, J. K. W., Lemke, B., Liu, Y., Liu, Z., Lott, M., Lotto Batista, M., Lowe, R., Odhiambo Sewe, M., Martinez-Urtaza, J., Maslin, M., McAllister, L., McMichael, C., Mi, Z., Milner, J., Minor, K., Minx, J. C., Mohajeri, N., Momen, N. C., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Munzert, S., Murray, K. A., Neville, T., Nilsson, M., Obradovich, N., O'Hare, M. B., Oliveira, C., Oreszczyn, T., Otto, M., Owfi, F., Pearman, O., Pega, F., Pershing, A., Rabbaniha, M., Rickman, J., Robinson, E. J. Z., Rocklöv, J., Salas, R. N., Semenza, J. C., Sherman, J. D., Shumake-Guillemot, J., Silbert, G., Sofiev, M., Springmann, M., Stowell, J. D., Tabatabaei, M., Taylor, J., Thompson, R., Tonne, C. (2023): The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet* 402 (10419), 2346–2394. [https://www.doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01859-7](https://www.doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7).
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Dell'Angelo, J. und D'Odorico, P. (2020): Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances* 6 (18), eaaz6031. <https://www.doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031>.
- Rosa, L., Sanchez, D. L., Realmonte, G., Baldocchi, D. und D'Odorico, P. (2021): The water footprint of carbon capture and storage technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 140, 110773. <https://www.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110773>.
- Rosenstock, T. S., Dawson, I. K., Aynekulu, E., Chomba, S., Degrande, A., Fornace, K., Jamnadass, R., Kimaro, A., Kindt, R., Lamanna, C., Malesu, M., Mausch, K., McMullin, S., Murage, P., Namoi, N., Njenga, M., Nyoka, I., Paez Valencia, A. M., Sola, P., Shepherd, K. und Steward, P. (2019): A Planetary Health Perspective on Agroforestry in Sub-Saharan Africa. *One Earth* 1 (3), 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.017>.
- Rosinger, A. Y. und Young, S. L. (2020): The toll of household water insecurity on health and human biology: Current understandings and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 7 (6), e1468. <https://doi.org/10.1002/wat2.1468>.
- Ross, B. (2017): Water Finance and Management: The Potential of Crowdfunding for Water P3s. <https://waterfm.com/crowdfunding-p3-water/>, erschienen am 15.02.2017.
- Roussel, J.-M., Soissons, L., Duda, J. J. und McCaffery, R. (2024): Editorial: Large-scale dam removal and ecosystem restoration. *Frontiers in Ecology and Evolution* 12, 1471146. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1471146>.
- RRC – River Restoration Centre (2024): Startpage: About Us. Cranfield: RRC. <https://www.therrc.co.uk/rrc>, abgerufen am 28.06.2024.
- Rusca, M., Savelli, E., Di Baldassarre, G., Biza, A. und Messori, G. (2023): Unprecedented droughts are expected to exacerbate urban inequalities in Southern Africa. *Nature Climate Change* 13 (1), 98–105. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01546-8>.
- Rusk, J., Maharjan, A., Tiwari, P., Chen, T.-H. K., Shneiderman, S., Turin, M. und Seto, K. C. (2022): Multi-hazard susceptibility and exposure assessment of the Hindu Kush Himalaya. *Science of The Total Environment* 804, 150039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150039>.
- Sahu, P. und Debsarma, C. (2023): Urban Water Scarcity: A Global Challenge and Impending Solutions. In: Thambidurai, P. und Dikshit, A. K. (Hrsg.): *Impacts of Urbanization on Hydrological Systems in India*. Cham: Springer Nature, 129–142. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21618-3_7.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F. und Marx, A. (2018): Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change* 8 (5), 421–426. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>.
- Sameh, A. (2023): A systematic review of frequency and geographic distribution of water-borne parasites in the Middle East and North Africa. *Eastern Mediterranean Health Journal* 29 (2), 151–161. <https://doi.org/10.26719/emhj.23.016>.
- Sands, P., Peel, J., Fabra, A. und Mackenzie, R. (2018): *Principles of International Environmental Law*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- San-Miguel-Ayaz, J., Durrant, T., Boca, R., Maiani, P., Libertá, G., Artés-Vivancos, T., Oom, D., Branco, A., de Rigo, D., Ferrari, D., Pfeiffer, H., Grecchi, R., Onida, M. und Löffler, P. (2022): Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2021. Luxemburg: EU. <https://www.doi.org/10.2760/34094>.
- Sanganyado, E. und Gwenzi, W. (2019): Antibiotic resistance in drinking water systems: Occurrence, removal, and human health risks. *Science of The Total Environment* 669, 785–797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.162>.
- Santoro, A. (2023): Traditional oases in Northern Africa as multifunctional agroforestry systems: a systematic literature review of the provided Ecosystem Services and of the main vulnerabilities. *Agroforestry Systems* 97, 81–96. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00789-w>.
- Sarkar, S., Gil, J. D. B., Keeley, J. und Jansen, K. (2021): The use of pesticides in developing countries and their impact on health and the right to food. Brüssel: European Union. <https://www.doi.org/10.2861/953921>.
- Sartori, M. und Schiavo, S. (2015): Connected we stand: a network perspective on trade and global food security. *Food Policy* 57, 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.10.004>.
- Sartori, M., Schiavo, S., Fracasso, A. und Riccaboni, M. (2017): Modeling the future evolution of the virtual water trade network: A combination of network and gravity models. *Advances in Water Resources* 110, 538–548. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.005>.
- Savelli, E., Mazzoleni, M., Di Baldassarre, G., Cloke, H. und Rusca, M. (2023): Urban water crises driven by elites' unsustainable consumption. *Nature Sustainability* 6, 929–940. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-023-01100-0>.
- SAWPA – Santa Ana Watershed Projekt Authority (2024): One Water One Watershed (OWOW) Program. Riverside, Kalifornien: SAWPA. <https://sawpa.gov/owow/>, abgerufen am 25.03.2024.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H. M., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., Sun, A., Taylor, R. G., Villholth, K. G., Vörösmarty, C. J. und Zheng, C. (2023): Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 87–101. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>.
- Schambeck, C. M., Magnus, B. S., Rozone de Souza, L. C., Moreira Leite, W. R., Derlon, N., Bittencourt Guimarães, L. und Ribeiro da Costa, R. H. (2020): Biopolymers recovery: dynamics and characterization of alginate-like exopolymers in an aerobic granular sludge system treating municipal wastewater without sludge inoculum. *Journal of Environmental Management* 263, 110394. <https://www.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110394>.
- Schellekens, G. und van Toor, J. (2019): Values at risk? Sustainability risks and goals in the Dutch financial sector. Amsterdam: De Nederlandsche Bank. <https://www.dnb.nl/media/hm1msmzo/values-at-risk-sustainability-risks-and-goals-in-the-dutch.pdf>.

- Schembergue, A., da Cunha, D. A., de Matos Carlos, S., Pires, M. V. und Faria, R. M. (2017): Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural* 55 (1), 9–30. <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550101>.
- Scherer, L., Boom, H. A., Barbarossa, V. und van Bodegom, P. M. (2023): Climate change threats to the global functional diversity of freshwater fish. *Glob Chang Biol* 29 (13), 3781–3793. <https://www.doi.org/10.1111/gcb.16723>.
- Schipper, L. (2020): Maladaptation: When Adaptation to Climate Change Goes Very Wrong. *One Earth* 3, 409–414. <https://www.doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.014>.
- Schlacke, S. (2021): Planende Verwaltung. In: Kahl, W. und Ludwigs, M. (Hrsg.): *Handbuch des Verwaltungsrechts Band I Grundstrukturen des deutschen Verwaltungsrechts*. München: C.F. Müller, 761–806.
- Schlacke, S. (2023): *Umweltrecht*. Baden-Baden: Nomos.
- Schleifer, L. und Otto, B. (2019): Water Can Exacerbate Inequality—or It Can Help Solve It. Washington, D.C.: World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/insights/water-can-exacerbate-inequality-or-it-can-help-solve-it>, err schienen am 22.03.2019.
- Schmeier, S. (2013): *Governing International Watercourses. River Basin Organizations and the sustainable governance of internationally shared rivers and lakes*. London: Routledge.
- Schmeisser, S., Miccoli, A., von Bergen, M., Berggren, E., Braeuning, A., Busch, W., Desaintes, C., Gourmelon, A., Grafström, R., Harrill, J., Hartung, T., Herzler, M., Kass, G. E. N., Klein-streuer, N., Leist, M., Luijten, M., Marx-Stoelting, P., Poetz, O., van Ravenzwaay, B., Roggeband, R., Rogiers, V., Roth, A., Sanders, P., Thomas, R. S., Marie Vinggaard, A., Vinken, M., van de Water, B., Luch, A. und Tralau, T. (2023): New approach methodologies in human regulatory toxicology – Not if, but how and when! *Environment International* 178, 108082. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108082>.
- Schmidt, M., Bastian, D. und Kresse, C. (2023): DERA Rohstoffinformationen Rohstoffrisikobewertung – Lithium. 54 Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff_lithium.html.
- Schomberg, A. C., Bringezu, S. und Flörke, M. (2021): Extended life cycle assessment reveals the spatially-explicit water scarcity footprint of a lithium-ion battery storage. *Communications Earth & Environment* 2 (11), 1–10. <https://www.doi.org/10.1038/s43247-020-00080-9>.
- Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P. und van Zanten, H. E. (2020): Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security* 26, 100404. <https://www.doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.
- Schulte, P. und Morrison, J. (2014): *Driving harmonization of water-related terminology. CEO Water Mandate Discussion Paper*. Oakland: Pacific Institute.
- Schürings, C., Feld, C. K., Kail, J. und Hering, D. (2022): Effects of agricultural land use on river biota: a meta-analysis. *Environmental Sciences Europe* 34, 124. <https://www.doi.org/10.1186/s12302-022-00706-z>.
- Schwachula, A. (2019): The BMBF's sustainability concept vs. global sustainable development. In: Schwachula, A. (Hrsg.): *Sustainable Development in Science Policy-Making*. Bielefeld: transcript Verlag, 262–267. <https://doi.org/10.14361/9783839448823-043>.
- SCM – Somerset Catchment Market (2024): The Somerset Catchment Market is an environmental services market that aims to accelerate the delivery of Nature-based Projects such as the creation of new woodlands and wetlands across South Somerset. Bath and North East Somerset (England): SCM. <https://www.somersetcatchmentmarket.uk/>, abgerufen am 18.06.2024.
- Scott, C. A., Zhang, F., Mukherji, A., Immerzeel, W., Mustafa, D. und Bharati, L. (2019): Water in the Hindu Kush Himalaya. In: Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. und Shrestha, A. B. (Hrsg.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham: Springer Nature, 257–299. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_8.
- SDSN – Sustainable Development Solutions Network (2023): *Implementing the SDG Stimulus*. Sustainable Development Report 2023. Paris, Dublin: SDSN, Dublin University Press. <https://www.doi.org/10.25546/102924>.
- SDSN – Sustainable Development Solutions Network (2024a): *International Spillovers*. New York: SDSN. <https://www.unsdnsn.org/our-work/sdg-transformation-center/>, abgerufen am 4.07.2024.
- SDSN – Sustainable Development Solutions Network (2024b): *Tracking Spillover Effects. Measure and promote actions to curb negative transboundary SDG impacts*. New York: SDSN. <https://sdgtransformationcenter.org/spillovers>, abgerufen am 4.07.2024.
- Seebacher, F., Narayan, E., Rummer, J. L., Tomlinson, S. und Cooke, S. J. (2023): How can physiology best contribute to wildlife conservation in a warming world? *Conservation Physiology* 11 (1), coad038. <https://www.doi.org/10.1093/conphys/coad038>.
- Seenivasagan, R. und Babalola, O. O. (2021): Utilization of Microbial Consortia as Biofertilizers and Biopesticides for the Production of Feasible Agricultural Product. *Biology* 10 (11), 1111. <https://doi.org/10.3390/biology10111111>.
- Segal, M. (2024): Singapore to Provide Funding for Companies to Meet New Climate Reporting Requirements. *ESG Today*. <https://www.esgtoday.com/singapore-to-provide-funding-for-companies-to-meet-new-climate-reporting-requirements/>, erschienen am 6.03.2024.
- Seijger, C., Ellen, G. J., Janssen, S., Verheijen, E. und Erkens, G. (2017): Sinking deltas: trapped in a dual lock-in of technology and institutions. *Prometheus* 35 (3), 193–213. <https://www.doi.org/10.1080/08109028.2018.1504867>.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Derczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M. und Zhou, B. (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. und Zhou, B. (Hrsg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1513–1766. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Sengupta, N. (1980): The indigenous irrigation organization in South Bihar. *The Indian Economic & Social History Review* 17 (2), 157–189. <https://doi.org/10.1177/001946468001700201>.
- Seto, K. C., Davis, S. J., Mitchell, R. B., Stokes, E. C., Unruh, G. und Ürgen-Vorsatz, D. (2016): Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources* 41, 425–452. <https://www.doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>.
- Sharkov, A. (2022): *Water abstraction charges in Bulgaria*. Brüssel: Institute for European Environmental Policy (IEEP).
- Sharma, S., Yadav, R. K. und Singh, A. P. (2022): Presence of medicinal materials in drinking water: A review. *Materials Today: Proceedings* 61, 1067–1072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.336>.
- Sharma, S., Bhardwaj, A., Thakur, M. und Saini, A. (2023): Understanding microplastic pollution of marine ecosystem: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–44. <https://www.doi.org/10.1007/s11356-023-28314-1>.
- Sheikholeslami, R. und Hall, J. W. (2023): Global patterns and key drivers of stream nitrogen concentration: A machine learning approach. *Science of The Total Environment* 868, 161623. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161623>.
- Shively, G. E. (2017): Infrastructure mitigates the sensitivity of child growth to local agriculture and rainfall in Nepal and Uganda. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (5), 903–908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524482114>.

- Shlezinger, M., Amitai, Y., Akviv, A., Gabay, H., Shechter, M. und Leventer-Roberts, M. (2018): Association between exposure to desalinated sea water and ischemic heart disease, diabetes mellitus and colorectal cancer; A population-based study in Israel. *Environmental Research* 166, 620–627. <https://www.doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.053>.
- Sibanda, W., Hansen, M. M. und Mukwada, G. (2023): Grappling with Gendered Crises: Women's Access and Participation in Water, Sanitation and Hygiene Activities at Tongogara Refugee Camp, Zimbabwe. *International Journal of Social Science Research and Review* 6 (7), 212–228. <https://doi.org/10.47814/ijssrr.v6i7.1462>.
- SIC-ICWC – Scientific-Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (2010): Online data of the Basin Water Organisation Amudarya. Taschkent, Usbekistan: SIC-ICWC. <http://www.cawater-info.net>, abgerufen am 19.08.2024.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P. und Portmann, F. T. (2010): Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (10), 1863–1880. <https://www.doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>.
- Simoens, M. C., Leipold, S. und Fuenfschilling, L. (2022): Locked in unsustainability: Understanding lock-ins and their interactions using the case of food packaging. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 45, 14–29. <https://www.doi.org/10.1016/j.eist.2022.08.005>.
- Simpson, N. P., Simpson, K. J., Ferreira, A. T., Constable, A., Glavovic, B., Eriksen, S. E. H., Ley, D., Solecki, W., Rodríguez, R. S. und Stringer, L. C. (2023): Climate-resilient development planning for cities: progress from Cape Town. *npj Urban Sustainability* 3, 10. <https://www.doi.org/10.1038/s42949-023-00089-x>.
- Simwambi, A., Hibler, S., Pietruschka, B. und Hawkins, P. (2017): Approaches to Faecal Sludge Management in Peri-Urban Areas: A Case Study in the City of Lusaka. Seattle, USA: Bill & Melinda Gates Foundation (BMGF).
- Simwambi, A., Kapembwa, M. A. und Kapanda, K. (2023): Effects of Poor Solid Waste Management on Faecal Sludge Emptying, Treatment and Disposal Services in Lusaka. *European Journal of Applied Sciences* 11 (4), 330–360. <https://www.doi.org/10.14738/aivp.114.15405>.
- Singh, N. K., Gourevitch, J. D., Wemple, B. C., Watson, K. B., Rizzo, D. M., Polasky, S. und Ricketts, T. H. (2019): Optimizing wetland restoration to improve water quality at a regional scale. *Environmental Research Letters* 14 (6), <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/ab1827>.
- Sinharoy, S. S., Pittluck, R. und Clasen, T. (2019): Review of drivers and barriers of water and sanitation policies for urban informal settlements in low-income and middle-income countries. *Utilities policy* 60, 100957. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100957>.
- SIWI – Stockholm International Water Institute und UNICEF – United Nations Children's Fund (2023): Water Scarcity and Climate Change Enabling Environment Analysis for WASH: Middle East and North Africa. Stockholm, New York: SIWI, UNICEF.
- Slater, D. (2019): Water Scarcity in Brazil: A Case Study. Quantico, USA: Marine Corps University Press (MCUP). <https://www.doi.org/10.36304/ExpwMCUP.2019.02>, erschienen am 23.10.2019.
- Smakhtin, V. (2018): Ecosystems in the Global Water Cycle. UN Chronicle – The Quest for Water. New York: United Nations (UN). <https://www.un.org/en/chronicle/article/ecosystems-global-water-cycle>, erschienen am 1.03.2018.
- Smith, D. M., Gordon, C., Kittikhoun, A., Molwantwa, J., Pacheco Mollinedo, P., Romdhane, A. B., Shrestha, R., Tindimugay, C. und McDonnell, R. (2023): Research and innovation missions to transform future water systems. *Nature Water* 1 (3), 219–222. <https://www.doi.org/10.1038/s44221-023-00049-w>.
- Söderberg, C. (2016): Complex governance structures and incoherent policies: Implementing the EU water framework directive in Sweden. *Journal of Environmental Management* 183, 90–97. <https://www.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.040>.
- Sokolow, S. H., Huttinger, E., Jouanard, N., Hsieh, M. H., Lafferty, K. D., Kuris, A. M., Riveau, G., Senghor, S., Thiam, C., N'Diaye, A., Faye, D. S. und De Leo, G. A. (2015): Reduced transmission of human schistosomiasis after restoration of a native river prawn that preys on the snail intermediate host. *PNAS* 112 (31), 9650–9655. <https://www.doi.org/10.1073/pnas.1502651112>.
- Solent Catchment Market (2024): Solent Catchment Market. What is the Solent Catchment Market? <https://www.solentnutrientmarket.org.uk/>, abgerufen am 18.06.2024.
- Solomon, D., Lehmann, J., Fraser, J. A., Leach, M., Amanor, K., Frausin, V., Kristiansen, S. M., Millimouno, D. und Fairhead, J. (2016): Indigenous African soil enrichment as a climate-smart sustainable agriculture alternative. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14 (2), 71–76. <https://doi.org/10.1002/fee.1226>.
- Soriano, É., Londe, L. d. R., Di Gregorio, L. T., Coutinho, M. P. und Santos, L. B. L. (2016): Water crisis in São Paulo evaluated under the disaster's point of view. *Ambiente & Sociedade* 19 (1), 21–42. <https://www.doi.org/10.1590/1809-4422asoc150120r1v1912016>.
- Sowby, R. und Hotchkiss, R. (2022): Minimizing Unintended Consequences of Water Resources Decisions. *Journal of Water Resources Planning and Management* 148 (1), 1–3. [https://www.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001623](https://www.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001623).
- Sowers, J. (2012): Institutional change in authoritarian regimes: Water and the state in Egypt. In: Steinberg, P. F. und VanDeveer, S. D. (Hrsg.): *Comparative Environmental Politics Theory, Practice, and Prospects*. Cambridge, US: MIT Press, 231–254. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt5vjs7f>.
- Sproule, B. (2002): Lithium in Bipolar Disorder. *Clinical Pharmacokinetics* 41 (9), 639–660. <https://doi.org/10.2165/00003088-200241090-00002>.
- Srigiri, S. R. und Dombrowsky, I. (2021): Governance of the water-energy-food nexus for an integrated implementation of the 2030 Agenda: Conceptual and methodological framework for analysis. Discussion Paper 2/2021. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE). <https://doi.org/10.23661/dp2.2021>.
- Srigiri, S. R. und Dombrowsky, I. (2022): Analysing the Water-Energy-Food Nexus from a polycentric governance perspective: Conceptual and methodological framework. *Frontiers in Environmental Science* 10, 725116. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.725116>.
- Srigiri, S. R., Scheumann, W. und Alamirew, T. (o.J.): Responsible governance of water tenure for achieving the 2030 Agenda: challenges in the Awash River Basin, Ethiopia. Rom: Food and Agriculture Organization (FAO).
- Srivastava, S. (2020) (Hrsg.): *Arsenic in drinking water and food*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2>.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2023): *Umwelt und Gesundheit konsequent zusammendenken. Sondergutachten*. Berlin: SRU.
- Stapleton, J., Bates, S., Lewis, M., Turner, S. R., Warne, D. und Florentine, S. (2023): A global review on arid zone restoration: approaches and challenges. *Restoration Ecology*, e14078. <https://www.doi.org/10.1111/rec.14078>.
- Stephenson, K. und Shabman, L. (2017): Can water quality trading fix the agricultural nonpoint source problem? *Annual Review of Resource Economics* 9, 95–116. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-053639>.
- Stern, J. H. und Stern, A. (2011): *Water harvesting through sand dams*. North Fort Myers, Florida: ECHO. <https://www.echocommunity.org/resources/7fdbb758-a1f7-4c4a-adc2-0a07a9f9981a>.
- Stock, N. L., Furdul, V. I., Muir, D. C. G. und Mabury, S. A. (2007): Perfluoroalkyl Contaminants in the Canadian Arctic: Evidence of Atmospheric Transport and Local Contamination. *Environmental Science & Technology* 41 (10), 3529–3536. <https://www.doi.org/10.1021/es062709x>.

- Strank, O. (2019): Common Concern of Humankind im Völkerrecht. Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60430-4>.
- Strobl, K., Moning, C. und Kollmann, J. (2019): Positive trends in plant, dragonfly, and butterfly diversity of rewetted montane peatlands. *Restoration Ecology* 28 (4), 796–806. <https://www.doi.org/10.1111/rec.12957>.
- Stroud, H. M., Kirshen, P. H. und Timmons, D. (2022): Monetary evaluation of co-benefits of nature-based flood risk reduction infrastructure to promote climate justice. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 28 (5), 1–21. <https://www.doi.org/10.1007/s11027-022-10037-2>.
- Stuart-Hill, S., Lukat, E., Pringle, C. und Pahl-Wostl, C. (2020): Lösung komplexer Wasserprobleme durch Koordination jenseits des Staates – Erkenntnisse aus Südafrika. Analysen und Stellungnahmen 20/2020. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE). <https://doi.org/10.23661/as20.2020>.
- Suckling, J., Hoolohan, C., Soutar, I. und Druckman, A. (2021): Unintended Consequences: Unknowable and Unavoidable, or Knowable and Unforgivable? *Frontiers in Climate* 3, 1–12. <https://www.doi.org/10.3389/fclim.2021.737929>.
- Sugg, M., Runkle, J., Leeper, R., Bagli, H., Golden, A., Handwerger, L. H., Magee, T., Moreno, C., Reed-Kelly, R., Taylor, M. und Woolard, S. (2020): A scoping review of drought impacts on health and society in North America. *Climatic Change* 162, 1177–1195. <https://www.doi.org/10.1007/s10584-020-02848-6>.
- swa – Stadtwerke Augsburg (2021): Augsburger Modell für sauberes Trinkwasser. Augsburg: SWA. <https://www.sw-augsburg.de/magazin/detail/augsburger-modell-fuer-sauberes-trinkwasser/>, erschienen am 15.10.2021.
- Syvrrud, A., Pohlner, H., Punthakey, J. F., Grant, M. und Green, T. (2021): Advancing Urban Water Security in the Indus Basin, Pakistan – Priority Actions for Karachi and Lahore. *Water* 13 (23), 3399. <https://doi.org/10.3390/w13233399>.
- Tabari, H. (2020): Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports* 10, 13768. <https://www.doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.
- Takakura, J. y., Fujimori, S., Hanasaki, N., Hasegawa, T., Hirabayashi, Y., Honda, Y., Iizumi, T., Kumano, N., Park, C., Shen, Z., Takahashi, K., Tamura, M., Tanoue, M., Tsuchida, K., Yokoki, H., Zhou, Q., Oki, T. und Hijioka, Y. (2019): Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways. *Nature Climate Change* 9 (10), 737–741. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-019-0578-6>.
- Talbot, R. und Chang, H. (2022): Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environmental Pollution* 292, 118393. <https://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118393>.
- Tambe, S. (2022): Rights-Based Approach to Livelihoods. In: Tambe, S. (Hrsg.): Teaching and Learning Rural Livelihoods: A Guide for Educators, Students, and Practitioners. Cham: Springer, 83–94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90491-3_7.
- Tamea, S., Laio, F. und Ridolfi, L. (2016): Global effects of local food-production crises: a virtual water perspective. *Scientific reports* 6 (1), 18803. <https://doi.org/10.1038/srep18803>.
- Tang, F. H. M., Lenzen, M., McBratney, A. und Maggi, F. (2021): Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience* 14 (4), 206–210. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5>.
- Tanveer, M., Hasanuzzaman, M. und Wang, L. (2019): Lithium in Environment and Potential Targets to Reduce Lithium Toxicity in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation* 38 (4), 1574–1586. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09957-210.1007/s00344-019-09957-2>.
- Tanzi, A. M. (2020): The inter-relationship between no harm, equitable and reasonable utilisation and cooperation under international water law. *International Environmental Agreements-Politics Law and Economics* 20 (4), 619–629. <https://www.doi.org/10.1007/s10784-020-09502-7>.
- Taylor, C., Robinson, T. R., Dunning, S., Rachel Carr, J. und Westoby, M. (2023): Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications* 14 (1), 487. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>.
- Taylor, K. S., Longboat, S. und Grafton, R. Q. (2019): Whose Rules? A Water Justice Critique of the OECD's 12 Principles on Water Governance. *Water* 11 (4), 809. <https://www.doi.org/10.3390/w11040809>.
- Taylor, P., Hornidge, A.-K., Leach, M., MacGregor, H., Mehdi, A. und Fung, M. L. (2022): Research, Evidence and Learning – the Need for Global Infrastructure. Think7 Policy Brief. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE).
- te Wierik, S. A., Gupta, J., Cammeraat, E. L. H. und Artzy-Randrup, Y. A. (2020): The need for green and atmospheric water governance. *WIREs Water* 7 (2), e1406. <https://www.doi.org/10.1002/wat2.1406>.
- te Wierik, S. A., Cammeraat, E. L. H., Gupta, J. und Artzy-Randrup, Y. A. (2021): Reviewing the Impact of Land Use and Land-Use Change on Moisture Recycling and Precipitation Patterns. *Water Resources Research* 57 (7), e2020WR029234. <https://www.doi.org/10.1029/2020WR029234>.
- Teskey, R., Wertin, T., Bauweraerts, I., Ameye, M., McGuire, M. A. und Steppe, K. (2015): Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant Cell Environ* 38 (9), 1699–1712. <https://www.doi.org/10.1111/pce.12417>.
- TFCCA – Task Force for Climate Change Adaptation (2012): How to manage cloudburst and rainwater - Action plan for a climate-proof Denmark. Kopenhagen: Danish Nature Agency.
- The City of Copenhagen (2012): Cloudburst Management Plan 2012. Kopenhagen: The City of Copenhagen.
- The City of Copenhagen (2015): Climate Change Adaptation and Investment Statement. Kopenhagen: The City of Copenhagen.
- The City of Copenhagen (2016): Klimakvarter: Copenhagen's first climate resilient neighborhood. Kopenhagen: The City of Copenhagen.
- Thielbörger, P. (2014): The Right(s) to Water. The Multi-Level Governance of a Unique Human Right. Heidelberg: Springer. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-642-33908-0>.
- Thieme, M., Birnie-Gauvin, K., Opperman, J. J., Franklin, P. A., Richter, H., Baumgartner, L., Ning, N., Vu, A. V., Brink, K., Sakala, M., O'Brien, G. C., Petersen, R., Tongchai, P. und Cooke, S. J. (2023): Measures to safeguard and restore river connectivity. *Environmental Reviews* 0 (0), 1–21. <https://doi.org/10.1139/er-2023-0019>.
- Thierfelder, C., Rusinamhodzi, L., Setimela, P., Walker, F. und Eash, N. S. (2015): Conservation agriculture and drought-tolerant germplasm: Reaping the benefits of climate-smart agriculture technologies in central Mozambique. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31 (5), 414–428. <https://www.doi.org/10.1017/s1742170515000332>.
- Thomashaussen, S., Maennling, N. und Mebratu-Tsegaye, T. (2018): A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector. *Resources Policy* 55, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.012>.
- Thompson-Hall, M., Carr, E. R. und Pascual, U. (2016): Enhancing and expanding intersectional research for climate change adaptation in agrarian settings. *Ambio* 45 (3), 373–382. <https://www.doi.org/10.1007/s13280-016-0827-0>.
- Tickner, D., Opperman, J. J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Cooke, S. J., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G., Harrison, I., Hughes, K., Jones, D., Leclere, D., Lynch, A. J., Leonard, P., McClain, M. E., Muruven, D., Olden, J. D., Ormerod, S. J., Robinson, J., Tharme, R. E., Thieme, M., Tockner, K., Wright, M. und Young, L. (2020): Bending the Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan. *Bioscience* 70 (4), 330–342. <https://www.doi.org/10.1093/biosci/biaa002>.
- Timmermann, A., Yun, K. S., Raia, P., Ruan, J., Mondanaro, A., Zeller, E., Zollikofer, C., Ponce de Leon, M., Lemmon, D., Willeit, M. und Ganopolski, A. (2022): Climate effects on archaic human habitats and species successions. *Nature* 604 (7906), 495–501. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-022-04600-9>.

- Tischbein, B., Manschadi, A. M., Conrad, C., Hornidge, A.-K., Bhaduri, A., Ul Hassan, M., Lamers, J. P. A., Awan, U. K. und Vlek, P. L. G. (2013): Adapting to water scarcity: constraints and opportunities for improving irrigation management in Khorezm, Uzbekistan. *Water Supply* 13 (2), 337–348. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.028>.
- TNC – The Nature Conservancy (2018): *Water Funds. Field Guide* 2018. Arlington, USA: TNC.
- Tomar, P., Thakur, N., Jhamta, S., Chowdhury, S., Kapoor, M., Singh, S., Shreaz, S., Rustagi, S., Rai, P. K., Rai, A. K. und Yadav, A. N. (2024): Bacterial biopesticides: Biodiversity, role in pest management and beneficial impact on agricultural and environmental sustainability. *Heliyon* 10 (11), e31550. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31550>.
- Tomscha, S. A., Bentley, S., E., P., Jackson, B., de Roiste, M., Hartley, S., Norton, K. und Deslippe, J. R. (2021): Multiple methods confirm wetland restoration improves ecosystem services. *Ecosystems and People* 17 (1), 25–40. <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1863266>.
- Toshovski, S., Kaiser, M., Fuchs, S., Sacher, F., Thoma, A. und Kümmel, V. (2020): Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen: Ein deutschlandweit harmonisiertes Vorgehen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).
- Toxopeus, H. und Polzin, F. (2021): Reviewing financing barriers and strategies for urban nature-based solutions. *Journal of Environmental Management* 289, 112371. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112371>.
- Tozer, L. (2023): Water pollution 'timebomb' threatens global health. Berlin: Nature. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02337-7>, erschienen am 18.07.2023.
- TPI – Tibet Policy Institute (2016): Lichu River Poisoned. Dharamsala, Indien: <https://tibetpolicy.net/lichu-river-poisoned/>, erschienen am 4.06.2016.
- Trémolet, S., Favero, A., Karres, N., Toledo, M., Kampa, E., Lago, M., Anzaldúa, G., Vidaurre, R., Tarpey, J., Makropoulos, C., Lykou, A., Hanania, S., Rebollo, V. und Anton, B. (2019): Investing in Nature for European Water Security. London: The Nature Conservancy, Ecologic Institute and ICLEI.
- Truppa, C., Yaacoub, S., Valente, M., Celentano, G., Ragazzoni, L. und Saulnier, D. (2024): Health systems resilience in fragile and conflict-affected settings: a systematic scoping review. *Conflict and Health* 18 (1), 2. <https://www.doi.org/10.1186/s13031-023-00560-7>.
- Tschora, H. und Cherubini, F. (2020): Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. *Global Ecology and Conservation* 22, e00919. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>.
- Tsilimekis, K. (2023): Antibiotika schützen, Resistenzen bekämpfen. Antibiotikaeinsatz in der industriellen Tierhaltung systematisch reduzieren. Bonn: Germanwatch.
- TU Berlin – Technische Universität Berlin Chair of Sustainable Engineering (2020): The Water Footprint of Organizations – Local Measures in Global Supply Chains, Final Report WELLE project. Berlin: TU Berlin. <https://bmbf-grow.de/de/welle>.
- Tubridy, F. (2020): Green climate change adaptation and the politics of designing ecological infrastructures. *Geoforum* 113, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.04.020>.
- Tups, G. (2022): Goldkugel oder Krisenverstärker? Neue Abhängigkeiten von synthetischen Düngemitteln und ihre Folgen für den afrikanischen Kontinent. Berlin: INKOTA-netzwerk e.V.
- Turkelboom, F., Demeyer, R., Vranken, L., De Becker, P., Raymaekers, F. und De Smet, L. (2021): How does a nature-based solution for flood control compare to a technical solution? Case study evidence from Belgium. *Ambio* 50 (8), 1431–1445. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01548-4>.
- Twomlow, S., Hove, L., Mupangwa, W., Masikati, P. und Mashingaidze, N. (2008): Precision conservation agriculture for vulnerable farmers in low-potential zones. Proceedings of the Workshop on Increasing the Productivity and Sustainability of Rainfed Cropping Systems of Poor, Smallholder Farmers, Tamale, Ghana, 22–25 September 2008. Colombo, Sri Lanka: The CGIAR Challenge Program on Water and Food.
- UBA – Umweltbundesamt (2017): Sind Biozideinträge in die Umwelt von besorgniserregendem Ausmaß? Empfehlungen des Umweltbundesamtes für eine Vorgehensweise zur Untersuchung der Umweltbelastung durch Biozide. UBA-Texte 15/2017. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sind-biozideintraege-in-die-umwelt-von>.
- UBA – Umweltbundesamt und BMU – Bundesministerium für Umwelt (2017): *Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen*. Dessau-Roßlau: UBA, BMU. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaft-in-deutschland-grundlagen>.
- UBA – Umweltbundesamt (2018a): Klimaschutz und Abwasserbehandlung. Sinnvolle Beiträge zur Energiewende. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA – Umweltbundesamt (2018b): Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. UBA-Texte 59/2018. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA – Umweltbundesamt (2021a): 20 Jahre Wasserrahmenrichtlinie: Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021_pp_20jahre_wrrl_bf.pdf.
- UBA – Umweltbundesamt (2021b): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland, Teilbericht 1: Grundlagen. Dessau-Roßlau: UBA.
- UBA – Umweltbundesamt (2022a): Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks. Zur Abbildung möglicher qualitativer und quantitativer Wasserbelastungen entlang eines Produktlebenszyklus. Texte 44/2022. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeptionelle-weiterentwicklung-des>.
- UBA – Umweltbundesamt (2022b): Wasserressourcen und ihre Nutzung. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#die-wassernutzer>, erschienen am 14.11.2022.
- UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Nutzung der Wasserressourcen. <https://www.umweltbundesamt.de/print/17814>, erschienen am 14.11.2022.
- UBA – Umweltbundesamt (2023a): Moving forward: The European Commission's Proposal for a Recast Urban Wastewater Treatment Directive. Scientific Opinion Paper. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/moving-forward-the-european-commissions-proposal>.
- UBA – Umweltbundesamt (2023b): EU-Verordnung zu Wasserwiederverwendung. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaftungen/wasserwiederverwendung/eu-verordnung-zu-wasserwiederverwendung#undefined>, erschienen am 20.07.2023.
- UBA – Umweltbundesamt (2023c): Abwasserwärme Ad-hoc Papier. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abwasserwaerme>.
- UBA – Umweltbundesamt (2023d): Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau: UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023>.
- UIS – UNESCO Institute for Statistics (2024): Research and Development Expenditure (% of GDP). Montreal, Quebec: UIS. <http://data.uis.unesco.org>, abgerufen am 25.07.2024.
- UN – United Nations (1994): United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa –UNCCD. New York: UN.
- UN – United Nations (2002): General comment no. 15 (2002) of the Committee on Economic, Social and Cultural Rights, The right to water (arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights). New York: UN. <https://digitallibrary.un.org/record/486454?v=pdf>.
- UN – United Nations (2008): UN Human Rights Council Resolution 7/22 Human rights and access to safe drinking water and sanitation. New York: UN.

- UN – United Nations (2010): Resolution adopted by the Human Rights Council 15/9 Human rights and access to safe drinking water and sanitation. New York: UN.
- UN – United Nations (2011): UN Human Rights Council Resolution 16/2 The human right to safe drinking water and sanitation. New York: UN.
- UN – United Nations (2018): Sustainable Development Goal 6. Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. New York: UN. <https://www.unwater.org/publications/sdg-6-synthesis-report-2018-water-and-sanitation>.
- UN – United Nations (2019): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: UN.
- UN – United Nations (2022): The Sustainable Development Goals Report 2022. New York: UN. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/goal-06/>.
- UN – United Nations (2023a): The Sustainable Development Goals Report. Special edition: Towards a Rescue Plan for People and Planet. New York: UN. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>.
- UN – United Nations (2023b): Letter from the President of the General Assembly – Water for Sustainable Development Conference Summary. New York: UN. <https://www.un.org/pga/77/2023/05/08/letter-from-the-president-of-the-general-assembly-water-for-sustainable-development-conference-summary/>.
- UN – United Nations (2023c): Global Sustainable Development Report 2023: Times of crisis, times of change: Science for accelerating transformations to sustainable development. New York: UN.
- UN – United Nations (2024): United Nations System-wide Strategy for Water and Sanitation. New York: UN.
- UN Water – United Nations Water (2021): Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all. Version: July 2021. Genf: UN Water. <https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all>.
- UN Water – United Nations Water (2023): WMO's Early Warnings for All - Action Plan for Africa. Genf: UN Water. <https://www.unwater.org/news/wmo%E2%80%99s-early-warnings-all-action-plan-africa>, erschienen am 16.10.2023.
- UN Water – United Nations Water (2024): Sustainable Development Goal 6 on water and sanitation (SDG 6): Global Status. Genf: UN Water. <https://www.sdg6data.org/en>, abgerufen am 7.06.2024.
- UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme (2022): World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: UN-Habitat. <https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities>.
- UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification (2023): Global Drought Snapshot 2023: The Need For Pro-active Action. Bonn, New York: UNCCD.
- UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2024): UN list of least developed countries. Genf: UNCTAD. <https://unctad.org/topic/least-developed-countries/list>, abgerufen am 6.02.2024.
- UNDP – United Nations Development Programme (2022): Human Development Report 2021/2022: Uncertain times, unsettled lives. Shaping our future in a transforming world. New York: UNDP.
- UNDP – United Nations Development Programme und OPHI – Oxford Poverty & Human Development Initiative (2022): Global Multidimensional Poverty Index 2022: Unpacking deprivation bundles to reduce multidimensional poverty. New York, Oxford: UNDP, OPHI.
- UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2024a): Regional Office for Europe and Central Asia. Genf: UNDRR. <https://www.undrr.org/about-undrr/where-we-work/regional-office-europe-central-asia>, abgerufen am 4.03.2024.
- UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2024b): Regional platforms. Genf: UNDRR. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/regional-platforms>, abgerufen am 4.03.2024.
- UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (1999): Protocol on Water and Health to the 1992 Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes. MP.WAT/2000/1. EUR/ICP/EHCO 020205/8Fin. Den Haag: UNECE. <https://unece.org/DAM/env/documents/2000/wat/mp.wat.2000.1.e.pdf>.
- UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (2024): Accelerating transboundary water cooperation through increased accession to and strengthened implementation of the Water Convention. Genf: UNECE. <https://sdgs.un.org/partnerships/accelerating-transboundary-water-cooperation-through-increased-accession-and>, abgerufen am 27.03.2024.
- UNEP – United Nations Environment Programme (1991): Report of the meeting of the legal expert group to examine the concept of common concern of mankind in relation to environmental issues. Nairobi: UNEP.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2021a): Progress on Integrated Water Resources Management. Tracking SDG 6 series: global indicator 6.5.1 updates and acceleration needs. Nairobi: UNEP.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2021b): Progress on Freshwater Ecosystems: Tracking SDG 6 Series – Global Indicator 6.6.1 Updates and Acceleration Needs. Nairobi: UNEP. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36691>.
- UNEP – United Nations Environment Programme, WEF – World Economic Forum, ELD – Economics of Land Degradation Initiative und Vivid Economics (2021): State Of Finance For Nature: Tripling investments in nature-based solutions by 2030. Nairobi: UNEP.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2022): Integrated water resources management – climate change adaptation case studies. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/case-study/integrated-water-resources-management-climate-change-adaptation-case-studies>, abgerufen am 28.05.2024.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2023): Bracing for Superbugs: Strengthening environmental action in the One Health response to antimicrobial resistance. Nairobi: UNEP.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation, UN Water – United Nations Water und WWAP – World Water Assessment Programme (2024): The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (1971): Übereinkommen über Feuchtgebiete, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel, von internationaler Bedeutung. Ramsar, Paris: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, UN Water – United Nations Water und WWAP – World Water Assessment Programme (2017): The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, UN Water – United Nations Water und WWAP – World Water Assessment Programme (2020): The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. Paris: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (2021): UNESCO Science Report - The Race against Time for Smarter Development. Paris: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, UN Water – United Nations Water und WWAP – World Water Assessment Programme (2021): The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. Paris: UNESCO. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>.

- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, UN Water – United Nations Water und WWAP – World Water Assessment Programme (2023): The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. Paris: UNESCO.
- UNESCO IHP – UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme (2022): IHP-IX Strategic Plan: Science for a Water Secure World in a Changing Environment. Ninth Phase 2022–2029. Paris: UNESCO.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention of Climate Change (2023a): Matters relating to adaptation. Glasgow–Sharm el-Sheikh work programme on the global goal on adaptation referred to in decision 7/CMA.3. UN Doc: FCCC/PA/CMA/2023/L.18. New York: United Nations (UN).
- UNFCCC – United Nations Framework Convention of Climate Change (2023b): Record Number of National Adaptation Plans Submitted in 2023, But More Are Needed. New York: United Nations (UN). <https://unfccc.int/news/record-number-of-national-adaptation-plans-submitted-in-2023-but-more-are-needed>, erschienen am 13.12.2023.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2023c): National adaptation plans 2023. Progress in the formulation and implementation of NAPs. Bonn: United Nations (UN). <https://unfccc.int/documents/635394>.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention of Climate Change (2024a): New Collective Quantified Goal on Climate Finance. New York: United Nations (UN). <https://unfccc.int/NCQG>, abgerufen am 30.05.2024.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention of Climate Change (2024b): Loss and Damage. Online Guide. New York: United Nations (UN). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/loss_and_damage_online_guide.pdf.
- Unfried, K., Kis-Katos, K. und Poser, T. (2022): Water scarcity and social conflict. *Journal of Environmental Economics and Management* 113, 102633. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102633>.
- UNGA – United Nations General Assembly (2010): Resolution 64/292 „The human right to water and sanitation“. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2013): Resolution 68/157: The human right to safe drinking water and sanitation. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2015a): Aktionsagenda von Addis Abeba der dritten Internationalen Konferenz über Entwicklungsfinanzierung (Aktionsagenda von Addis Abeba). Resolution der Generalversammlung A/RES/69/313, verabschiedet am 27. Juli 2015. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2015b): Resolution 70/169 The Human Right to safe drinking water and sanitation. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2022): Resolution 76/300. The human right to a clean, healthy and sustainable environment. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2023): Follow-up to the United Nations Conference on the Midterm Comprehensive Review of the Implementation of the Objectives of the International Decade for Action, “Water for Sustainable Development”, 2018–2028. A/RES/77/334. New York: United Nations (UN).
- UNICEF – United Nations Children’s Fund (2018): Zimbabwe – Water, Sanitation and Hygiene (WASH) 2018 Budget Brief. New York: UNICEF.
- UNICEF – United Nations Children’s Fund und WHO – World Health Organization (2023): Progress on household drinking-water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. New York: UNICEF, WHO. <https://www.unwater.org/publications/who/unicef-joint-monitoring-program-update-report-2023>.
- UNICEF – United Nations Children’s Fund (2021): Urban Water Scarcity Guidance Note. Preventing Day Zero. New York: UNICEF.
- Unruh, G. C. (2000): Understanding carbon lock-in. *Energy Policy* 28 (12), 817–830. [https://www.doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://www.doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).
- UNWC – United Nations Water Conference (2023): Interactive dialogue 1: water for health: access to water, sanitation and hygiene, including the human rights to safe drinking water and sanitation (Sustainable Development Goal targets 6.1, 6.2 and 6.3 and Goals 1, 3, 4, 5 and 17). New York: United Nations (UN).
- Upadhyay, V. (2006): A Rights Based Approach to Water User Associations in India. New Delhi: International Environmental Law Research Centre (IELRC). https://www.ielrc.org/activities/workshop_0612/content/d0620.pdf.
- UWCI – Urban Water Catalyst Initiative (2024): The Urban Water Catalyst Initiative. Bonn: UWCI. <https://www.urbanwaterci.org/home>, abgerufen am 1.06.2024.
- Vallino, E., Ridolfi, L. und Laio, F. (2021): Trade of economically and physically scarce virtual water in the global food network. *Scientific Reports* 11 (1), 22806. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01514-w>.
- van Oppenraaij, J., Torkelson, R., van Ginhoven, D., Blokland, M., Mbage, N. a. a., Sweerts, J. P. und Njoroge, E. (2022): Chapter 15 – Tapping local capital markets for water and sanitation: the case of the Kenya Pooled Water Fund. In: Leflaive, X., Dominique, K. und Alaerts, G. J. (Hrsg.): *Financing Investment in Water Security*. Amsterdam: Elsevier, 309–345. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822847-0.00011-9>.
- van Veen, H. und Sasidharan, R. (2021): Shape shifting by amphibious plants in dynamic hydrological niches. *New Phytologist* 229 (1), 79–84. <https://doi.org/10.1111/nph.16347>.
- van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S. und Riahi, K. (2016): Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change* 6 (4), 375–380. <https://www.doi.org/10.1038/nclimate2903>.
- van Vliet, M. T. H., Thorslund, J., Strokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H., Nkwasa, A., Tang, T., Kaushal, S. S., Kumar, R., van Griensven, A., Bouwman, L. und Mosley, L. M. (2023): Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>.
- van Westen, R. M., Kliphuis, M. und Dijkstra, H. A. (2024): Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances* 10 (6), eadk1189. <https://www.doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>.
- Vansteelandt, W. M. G. (2023): A godwit perspective on rapid wetland loss in Doñana and the Guadalquivir delta. *Wader Study* 130 (2), 95–98. <https://www.doi.org/10.18194/ws.00315>.
- Vari, A., Podschun, S. A., Eros, T., Hein, T., Pataki, B., Ioja, I. C., Adamescu, C. M., Gerhardt, A., Gruber, T., Dedic, A., Ciric, M., Gavrilovic, B. und Baldi, A. (2022): Freshwater systems and ecosystem services: Challenges and chances for cross-fertilization of disciplines. *Ambio* 51 (1), 135–151. <https://www.doi.org/10.1007/s13280-021-01556-4>.
- VCI – Verband der Chemischen Industrie (2017): Beiträge der Chemie zur Wasserversorgung der Zukunft aus Sicht der Forschungs- und Technologiepolitik. Frankfurt am Main: VCI.
- Veldwisch, G. J. A. (2008): Cotton, rice & water: the transformation of agrarian relations, irrigation technology and water distribution in Khorezm, Uzbekistan. Dissertation. Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. <https://hdl.handle.net/20.500.11811/3285>.
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A. und Flexer, V. (2023): Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 149–165. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. und Weingartner, R. (2007): Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* 43 (7), 1–11. <https://www.doi.org/10.1029/2006wr005653>.

- Vogl, A. L., Bryant, B. P., Hunink, J. E., Wolny, S., Apse, C. und Droogers, P. (2017): Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River basin, Kenya. *Journal of Environmental Management* 195 (1), 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.013>.
- von Bogdandy, A. und Goldmann, M. (2009): Die Ausübung internationaler öffentlicher Gewalt durch Politikbewertung. Die PISA-Studie der OECD als Muster einer neuen völkerrechtlichen Handlungsform. *Zeitschrift für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht (ZaöRV)* 69, 51–102.
- von der Leyen, U. (2024): Europe's Choice: Political Guidelines for the Next European Commission 2024–2029. Straßburg: EU.
- von Haldenwang, C. (2017): The political cost of local revenue mobilization: decentralization of the property tax in Indonesia. *Public Finance and Management* 17 (2), 124–151. <https://doi.org/10.1177/152397211701700202>.
- von Haldenwang, C., Millán-Narotzky, L., Mosquera Valderrama, I. und Redonda, A. (2024): The Role of Tax Expenditures in Enabling Illicit Financial Flows. *International Development Policy. Revue internationale de politique de développement*, 17. <https://doi.org/10.4000/11q99>.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S. und Bierkens, M. F. P. (2010): Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters* 37 (20), 1–5. <https://www.doi.org/10.1029/2010gl044571>.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H. und Bierkens, M. F. P. (2012): Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research* 48 (6), 1–18. <https://www.doi.org/10.1029/2011wr010562>.
- Wada, Y. und Bierkens, M. F. (2014): Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections. *Environmental Research Letters* 9 (10), 104003. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104003>.
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P. und Wiberg, D. (2016): Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFA) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development* 9 (1), 175–222. <https://www.doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>.
- Wagenknecht, K., Woods, T., Nold, C., Rüfenacht, S., Voight-Heucke, S., Kaplan, A., Hecker, S. und Vohland, K. (2021): A question of dialogue? Reflections on how citizen science can enhance communication between science and society. *Journal of Science Communication* 20 (3), A13. <https://doi.org/10.22323/2.20030213>.
- Wagner-Wenz, R., van Zuilichem, A.-J., Göllner-Völker, L., Berberich, K., Weidenkaff, A. und Schebek, L. (2023): Recycling routes of lithium-ion batteries: A critical review of the development status, the process performance, and life-cycle environmental impacts. *MRS Energy & Sustainability* 10, 1–34. <https://www.doi.org/10.1557/s43581-022-00053-9>.
- Waleng, N. J. und Nomngongo, P. N. (2022): Occurrence of pharmaceuticals in the environmental waters: African and Asian perspectives. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 4, 50–66. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.11.002>.
- Walker, W. E., Loucks, D. P. und Carr, G. (2015): Social Responses to Water Management Decisions. *Environmental Processes* 2 (3), 485–509. <https://www.doi.org/10.1007/s40710-015-0083-5>.
- Wang, H. und Ma, M. (2016): Impacts of Climate Change and Anthropogenic Activities on the Ecological Restoration of Wetlands in the Arid Regions of China. *Energies* 9 (3), <https://www.doi.org/10.3390/en9030166>.
- Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T. H. und Strokal, M. (2024): A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nat Commun* 15 (1), 880. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.
- Wang, R., Ding, J., Ge, X., Wang, J., Qin, S., Tan, J., Han, L. und Zhang, Z. (2023): Impacts of climate change on the wetlands in the arid region of Northwestern China over the past 2 decades. *Ecological Indicators* 149, <https://www.doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110168>.
- Wang, X., Daigger, G., de Vries, W., Kroeze, C., Yang, M., Ren, N.-Q., Liu, J. und Butler, D. (2019): Impact hotspots of reduced nutrient discharge shift across the globe with population and dietary changes. *Nature communications* 10 (1), 2627. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10445-0>.
- Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Keys, P. W., van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G. und Gordon, L. J. (2018): Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (8), 4311–4328. <https://www.doi.org/10.5194/hess-22-4311-2018>.
- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., Van Der Ent, R. J., Fetzer, I., Te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P. W., Gleeson, T., Cornell, S. E., Steffen, W., Bai, X. und Rockström, J. (2022): A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth & Environment* 3 (6), 380–392. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>.
- Wasser-Wissen (2024): Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB). Langwedel: Wasser-Wissen. <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/b/bsb.htm>, abgerufen am 20.11.2024.
- Wasti, A., Ray, P., Wi, S., Folch, C., Ubierna, M. und Karki, P. (2022): Climate change and the hydropower sector: A global review. *WIREs Climate Change* 13 (2), e757. <https://www.doi.org/10.1002/wcc.757>.
- Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K. und Giurco, D. (2021): Sustainable energy transitions require enhanced resource governance. *Journal of Cleaner Production* 312 (127698), <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127698>.
- Water for Climate Pavilion (2024): Achieving the Global Goal on Adaptation. Dubai: Water for Climate Pavilion. <https://waterforclimate.net/themes/global-goal-on-adaptation/>, abgerufen am 30.05.2024.
- WaterAid (2024): Clean Nigeria Campaign. Nigeria ranks first among countries practicing open defecation globally. Here's what we are supporting the Government to implement to address the crisis. Jabi, Nigeria: WaterAid. <https://www.wateraid.org/ng/get-involved/clean-nigeria-campaign>, abgerufen am 10.04.2024.
- Watts, J. (2017): The Amazon effect: how deforestation is starving São Paulo of water. London: The Guardian. <https://www.theguardian.com/cities/2017/nov/28/sao-paulo-water-amazon-deforestation>, erschienen am 28.11.2017.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2011): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2021): Über Klimaneutralität hinausdenken. Politikpapier 12. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2023): Gesund leben auf einer gesunden Erde. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2024): Biodiversität: Jetzt dringend handeln für Natur und Mensch. Politikpapier 13. Berlin: WBGU.

- WD – Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2022): Kommunale Finanzhoheit in Deutschland. Sachstand WD 4 – 3000 – 046/22. Berlin: WD 4 Fachbereich – Haushalt und Finanzen.
- WD – Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2023): Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken. Ausarbeitung WD 5 – 3000 – 138/22. Berlin: WD5 Fachbereich – Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft.
- WEF – World Economic Forum (2024): Quantifying the Impact of Climate Change on Human Health. Insight report. Genf: WEF.
- Weidlich, E. W. A., Flórido, F. G., Sorriani, T. B., Brancalion, P. H. S. und Peralta, G. (2020): Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology* 57 (9), 1806–1817. <https://www.doi.org/10.1111/1365-2664.13656>.
- Weiss, E. B. (2012): The Coming Water Crisis: A Common Concern of Humankind. *Transnational Environmental Law* 1 (1), 153–168. <https://www.doi.org/10.1017/S2047102511000100>.
- Weko, S. und Lahn, G. (2024): Tackling trade-related water risks: How importing countries can address water stress from global commodity production. London: The Royal Institute of International Affairs, Chatham House.
- Wen, Y., Schoups, G. und Van De Giesen, N. (2017): Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Scientific reports* 7 (1), 43289. <https://doi.org/10.1038/srep43289>.
- Werner, G., Abu Sin, M., Bahrs, C., Brogden, S., Feßler, A. T., Hagel, S., Kaspar, H., Köck, R., Kreienbrock, L., Krüger-Haker, H., Maechler, F., Noll, I., Pletz, M. W., Tenhagen, B.-A., Schwarz, S., Walther, B. und Mielke, M. (2023): Therapierrelevante Antibiotikaresistenzen im One-Health-Kontext. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 66 (6), 628–643. <https://www.doi.org/10.1007/s00103-023-03713-4>.
- Wester, P. und Warner, J. (2002): River basin management reconsidered. In: Turton, A. und Henwood, R. (Hrsg.): *Hydropolitics in the developing world: A Southern African perspective*. Pretoria: African Water Issues Research Unit (AWIRU), 61–71.
- Westphal-Settele, K., Konradi, S., Balzer, F., Schönfeld, J. und Schmithausen, R. (2018): Die Umwelt als Reservoir für Antibiotikaresistenzen. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 61 (5), 533–542. <https://www.doi.org/10.1007/s00103-018-2729-8>.
- Wezel, A., Zipfer, M., Aubry, C., Barataud, F. und Heißenhuber, A. (2016): Result-oriented approaches to the management of drinking water catchments in agricultural landscapes. *Journal of Environmental Planning and Management* 59 (2), 183–202. <https://www.doi.org/10.1080/09640568.2014.1000453>.
- WGG – Wassergenossenschaft Gramastetten (2024): Willkommen: Wassergenossenschaft Gramastetten. Gramastetten: WGG. <https://www.wassergenossenschaft.or.at>, abgerufen am 5.03.2024.
- Wheeler, S. A., Zuo, A., Xu, Y., Haensch, J. und Seidl, C. (2020): Water market literature review and empirical analysis. Canberra: Australian Competition and Consumer Commission (ACCC).
- Whitmee, S., Green, R., Belesova, K., Hassan, S., Cuevas, S., Murage, P., Picetti, R., Clercq-Roques, R., Murray, K., Falconer, J., Anton, B., Reynolds, T., Sharma Waddington, H., Hughes, R. C., Spadaro, J., Aguilar Jaber, A., Saheb, Y., Campbell-Lendrum, D., Cortés-Puch, M., Ebi, K., Huxley, R., Mazzucato, M., Oni, T., de Paula, N., Peng, G., Revi, A., Rockström, J., Srivastava, L., Whitmarsh, L., Zougmore, R., Phumaphi, J., Clark, H. und Haines, A. (2024): Pathways to a healthy net-zero future: report of the Lancet Pathfinder Commission. *Lancet* 403 (10421), 67–110. [https://www.doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)02466-2](https://www.doi.org/10.1016/s0140-6736(23)02466-2).
- WHO – World Health Organization und UNICEF – United Nations Children's Fund (2020): State of the world's sanitation: an urgent call to transform sanitation for better health, environments, economies and societies. New York: WHO, UNICEF.
- WHO – World Health Organization (2022a): Guidelines for drinking-water quality. Genf: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>.
- WHO – World Health Organization (2022b): Fact sheet: Antibiotic Resistance. Genf: WHO. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance>, erschienen am 31.07.2020.
- WHO – World Health Organization (2023): Burden of disease attributable to unsafe drinking-water, sanitation and hygiene, 2019 update. Genf: WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240075610>.
- WHO – World Health Organization und UNICEF – United Nations Children's Fund (2024): Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP) – bearbeitet durch Our World in Data. Oxford: Our World in Data.
- Wilkes, M. A., Carrivick, J. L., Castella, E., Ilg, C., Cauvy-Fraunie, S., Fell, S. C., Fureder, L., Huss, M., James, W., Lencioni, V., Robinson, C. und Brown, L. E. (2023): Glacier retreat reorganizes river habitats leaving refugia for Alpine invertebrate biodiversity poorly protected. *Nature Ecology & Evolution* 7 (6), 841–851. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02061-5>.
- WISE – Water Information System for Europe (2021): Chemical status - map (with or without uPBTs) by RBD. <https://water.europa.eu/freshwater/resources/metadatas/dashboards/chemical-status/chemical-status-map-with-or-without-upbts-by-rbd?activeTab=e406a006-cc3c-4948-a680-998dfdb3ad05>, erschienen am 14.07.2021.
- WMO – World Meteorological Organization (2023): State of Global Water Resources 2022. Genf: WMO. <https://library.wmo.int/idurl/4/68473>.
- Wohl, E., Lane, S. N. und Wilcox, A. C. (2015): The science and practice of river restoration. *Water Resources Research* 51 (8), 5974–5997. <https://doi.org/10.1002/2014WR016874>.
- Wolf, J., Johnston, R. B., Ambelu, A., Arnold, B. F., Bain, R., Brauer, M., Brown, J., Caruso, B. A., Clasen, T., Colford, J. M., Jr., Mills, J. E., Evans, B., Freeman, M. C., Gordon, B., Kang, G., Lanata, C. F., Medlicott, K. O., Pruss-Ustun, A., Troeger, C., Boisson, S. und Cumming, O. (2023): Burden of disease attributable to unsafe drinking water, sanitation, and hygiene in domestic settings: a global analysis for selected adverse health outcomes. *Lancet* 401 (10393), 2060–2071. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)00458-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)00458-0).
- Wolf, S., Esser, V., Schüttrumpf, H. und Lehmkuhl, F. (2021): Influence of 200 years of water resource management on a typical central European river. Does industrialization straighten a river? *Environmental Sciences Europe* 33, 15. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00460-8>.
- Wołowicz, M., Komorowska-Kaufman, M., Pruss, A., Rzepa, G. und Bajda, T. (2019): Removal of Heavy Metals and Metalloids from Water Using Drinking Water Treatment Residuals as Adsorbents: A Review. *Minerals* 9 (8), 487. <https://www.doi.org/10.3390/min9080487>.
- Wong, T. H. F., Rogers, B. C. und Brown, R. R. (2020): Transforming Cities through Water-Sensitive Principles and Practices. *One Earth* 3 (4), 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.012>.
- Woolway, R. I., Sharma, S., Weyhenmeyer, G. A., Debolskiy, A., Golub, M., Mercado-Bettin, D., Perroud, M., Stepanenko, V., Tan, Z., Grant, L., Ladwig, R., Mesman, J., Moore, T. N., Shatwell, T., Vanderkelen, I., Austin, J. A., DeGasperi, C. L., Dokulil, M., La Fuente, S., Mackay, E. B., Schladow, S. G., Watanabe, S., Marce, R., Pierson, D. C., Thiery, W. und Jennings, E. (2021): Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications* 12 (1), 2318. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>.
- World Bank (2016a): High and dry: Climate change, water, and the economy. Washington, D.C.: World Bank.
- World Bank (2016b): Modernizing Uzbekistan's Water Sector – with Citizen Engagement. Washington, D.C.: World Bank. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2016/02/11/modernizing-uzbekistans-water-sector-with-citizen-engagement>, erschienen am 11.02.2016.

- World Bank (2016c): Water Revolving Fund in the Philippines. Case studies in blended finance for water and sanitation. Washington, D.C.: World Bank Water Global Practice.
- World Bank (2018): Beyond Scarcity: Water Security in the Middle East and North Africa. MENA Development Report Series. Washington, D.C.: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/27659>.
- World Bank (2022): Market-Based Models and Public-Private Partnership Options for Non-Sewered Sanitation in Selected Cities and Towns in Kenya. Washington, D.C.: World Bank.
- World Bank (2023a): Global Economic Prospects, Juni 2023. Washington, D.C.: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1951-3>.
- World Bank (2023b): Water Overview. Washington, D.C.: World Bank. <https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>, abgerufen am 12.12.2023.
- World Bank (2023c): What the Future Has in Store: A New Paradigm for Water Storage—Overview for Policy Makers. Washington, DC: World Bank.
- World Bank (2023d): World Bank Country and Lending Groups. Washington, DC: World Bank. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>, abgerufen am 10.03.2023.
- WTO – World Trade Organization (2023): WTO's contribution to attaining UN Sustainable Development Goals: 2023 update to the High-Level Political Forum. Genf: WTO. https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/un_hlpf23_e.htm.
- WTO – World Trade Organization (2024): Preparations for upcoming 2024 Global Review of Aid for Trade intensify. Genf: WTO. https://www.wto.org/english/news_e/news24_e/aid_30apr24_e.htm, abgerufen am 4.06.2024.
- Wunder, S., Kaphengst, T., Frelüh-Larsen, A., McFarland, K. und Albrecht, S. (2018): Land Degradation Neutrality. Handlungsempfehlungen zur Implementierung des SDG-Ziels 15.3 und Entwicklung eines bodenbezogenen Indikator. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).
- WWC – World Water Council und OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2015): Water: Fit to Finance? Catalysing national growth through investment in water security. Report of the High Level Panel on Financing Infrastructure for a Water-Secure World. Marseille: WWC.
- WWF – World Wide Fund for Nature (2020): Water Stewardship: Gemeinsame Probleme – gemeinsame Lösungen. Gland: WWF. <https://www.wwf.de/themen-projekte/fluesse-seen/wasser-politik-maerkte/water-stewardship/>, abgerufen am 4.06.2024.
- Xie, Y., Liu, X., Wei, H., Chen, X., Gong, N., Ahmad, S., Lee, T., Ismail, S. und Ni, S.-Q. (2022): Insight into impact of sewage discharge on microbial dynamics and pathogenicity in river ecosystem. *Scientific Reports* 12 (1), 6894. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09579-x>.
- Xu, H., Liu, L. und Ding, P. (2021a): Building Climate Resilient City through Multiple Scale Cooperative Planning: Experiences from Copenhagen. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1203 (3), 032063. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/1203/3/032063>.
- Xu, H., Yang, R. und Song, J. (2021b): Agricultural Water Use Efficiency and Rebound Effect: A Study for China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (13), 7151. <https://www.doi.org/10.3390/ijerph18137151>.
- Xu, J., Morris, P. J., Liu, J. und Holden, J. (2018): Hotspots of peatland-derived potable water use identified by global analysis. *Nature Sustainability* 1 (5), 246–253. <https://www.doi.org/10.1038/s41893-018-0064-6>.
- Xu, J., Badola, R., Chettri, N., Chaudhary, R. P., Zomer, R., Pokhrel, B., Hussain, S. A., Pradhan, S. und Pradhan, R. (2019): Sustaining Biodiversity and Ecosystem Services in the Hindu Kush Himalaya. In: Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. und Shrestha, A. B. (Hrsg.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham: Springer Nature, 127–165. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_5.
- Yao, T., Bolch, T., Chen, D., Gao, J., Immerzeel, W., Piao, S., Su, F., Thompson, L., Wada, Y., Wang, L., Wang, T., Wu, G., Xu, B., Yang, W., Zhang, G. und Zhao, P. (2022): The imbalance of the Asian water tower. *Nature Reviews Earth & Environment* 3 (10), 618–632. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>.
- Yazdan, M. M. S., Kumar, R. und Leung, S. W. (2022): The Environmental and Health Impacts of Steroids and Hormones in Wastewater Effluent, as Well as Existing Removal Technologies: A Review. *Ecologies* 3 (2), 206–224. <https://www.doi.org/10.3390/ecologies3020016>.
- Yin, J., Gao, Y., Chen, R., Yu, D., Wilby, R., Wright, N., Ge, Y., Bricker, J., Gong, H. und Guan, M. (2023): Flash floods: why are more of them devastating the world's driest regions? *Nature* 615 (7951), 212–215. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00626-9>.
- Yuan, X., Wang, Y., Ji, P., Wu, P., Sheffield, J. und Otkin, J. A. (2023): A global transition to flash droughts under climate change. *Science* 380 (6641), 187–191. <https://www.doi.org/10.1126/science.abn6301>.
- Zadjelovic, V., Wright, R. J., Borsetto, C., Quartey, J., Cairns, T. N., Langille, M. G. I., Wellington, E. M. H. und Christie-Olea, J. A. (2023): Microbial hitchhikers harbouring antimicrobial-resistance genes in the riverine plastsphere. *Microbiome* 11, 225. <https://www.doi.org/10.1186/s40168-023-01662-3>.
- Zak, D. und McInnes, R. J. (2022): A call for refining the peatland restoration strategy in Europe. *Journal of Applied Ecology* 59 (11), 2698–2704. <https://www.doi.org/10.1111/1365-2664.14261>.
- Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F. und Toreti, A. (2017): Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters* 12 (6), 064008. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>.
- Zeit Online (2023): US-Bundesstaaten wollen Wasser sparen, um den Colorado River zu retten. Hamburg: Zeit Online. <https://www.zeit.de/politik/ausland/2023-05/usa-klimakrise-colorado-river-wasser-sparen>, erschienen am 23.05.2023.
- Zeitoun, M., Goulden, M. und Tickner, D. (2013): Current and future challenges facing transboundary river basin management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 4 (5), 331–349. <https://doi.org/10.1002/wcc.228>.
- Zengerling, C. (2020): Stärkung von Klimaschutz und Entwicklung durch internationales Handelsrecht. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“. Berlin: WBGU.
- Zhang, F., Zeng, C., Zhang, Q. und Yao, T. (2022): Securing water quality of the Asian Water Tower. *Nature Reviews Earth & Environment* 3 (10), 611–612. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-022-00347-z>.
- Zhang, G., Carrivick, J. L., Emmer, A., Shugar, D. H., Veh, G., Wang, X., Labedz, C., Mergili, M., Mölg, N., Huss, M., Allen, S., Sugiyama, S. und Lützow, N. (2024): Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1–16. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>.
- Zhang, H., Xu, Y. und Kanyerere, T. (2020): A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 118–119, 102887. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>.
- Zhang, T., Wang, W., An, B. und Wei, L. (2023): Enhanced glacial lake activity threatens numerous communities and infrastructure in the Third Pole. *Nature Communications* 14 (1), 8250. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-023-44123-z>.
- Zhang, Y., Zhang, L., Huang, Z., Li, Y., Li, J., Wu, N., He, J., Zhang, Z., Liu, Y. und Niu, Z. (2019): Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 177, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>.

- Zhang, Y. K. und Schilling, K. E. (2006): Effects of land cover on water table, soil moisture, evapotranspiration, and groundwater recharge: A Field observation and analysis. *Journal of Hydrology* 319 (1–4), 328–338. <https://www.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.044>.
- Zhao, Y., Wang, G., Zhao, M., Wang, M., Hu, N., Jiang, M. und Qin, L. (2021): The potentials of wetland restoration after farming differ between community types due to their differences in seed limit and salt tolerances in the Songnen Plain, China. *Ecological Indicators* 131, <https://www.doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108145>.
- Zhou, T. und Endreny, T. (2020): The Straightening of a River Meander Leads to Extensive Losses in Flow Complexity and Ecosystem Services. *Water* 12 (6), 1680. <https://doi.org/10.3390/w12061680>.

Glossar

Agenda 2030

Die von der internationalen Staatengemeinschaft 2015 auf Ebene der Vereinten Nationen verabschiedete Erklärung „Transformation unserer Welt: Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ (Agenda 2030) mit ihren 17 Entwicklungszielen stellt einen politischen Orientierungsrahmen für globale Nachhaltigkeit dar. Die Ziele der Agenda sollen bis 2030 erreicht werden. Unter dem Stichwort Post-2030-Agenda gibt es bereits Überlegungen für daran anschließend zu vereinbarende künftige Entwicklungsziele.

Aquifer

Ein Aquifer (auch Grundwasserleiter) ist ein Gesteinskörper, der Hohlräume enthält und damit geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten. Dabei können Porengrundwasserleiter (Locker- oder Festgestein mit überwiegend durchflusswirksamen Porenanteilen), Kluftgrundwasserleiter (Festgesteine mit überwiegend durchflusswirksamen Trennfugen) und Karstgrundwasserleiter (Festgesteine mit überwiegend durchflusswirksamen Karsthohlräumen) unterschieden werden (DIN, 1994).

Biochemischer Sauerstoffbedarf

bezeichnet die Menge an im Wasser gelöstem Sauerstoff, die zum biologischen Abbau gelöster organischer Verbindungen im Abwasser benötigt wird (Wasser-Wissen, 2024).

Biodiversität

oder biologische Vielfalt bezeichnet die Variabilität unter lebenden Organismen jeglicher Herkunft, darunter unter anderem Land-, Meeres- und sonstige → Ökosysteme und die ökologischen Komplexe, zu denen sie gehören; dies umfasst die Vielfalt der Gene, die Vielfalt der Arten und die Vielfalt der Ökosysteme (Artikel 2 der CBD).

Blitzdürren

entstehen durch eine Hitzewelle mit ungewöhnlich hohen Lufttemperaturen oder als Reaktion auf eine ungewöhnlich extreme Trockenperiode aufgrund mangelnder Niederschläge.

Blaues Wasser

umfasst alle Wasserressourcen in Oberflächengewässern (Bäche, Flüsse, Seen, Talsperren) und Grundwasser.

Bodenfeuchte

ist der Wassergehalt der oberen Bodenschicht in der aktiven Schicht des Bodens, in der Regel in den obersten 1–2 m. Sie stellt meist die Hauptwasserquelle für die Landwirtschaft und die natürliche Vegetation dar (Robock, 2003).

Deliberative Beteiligungsverfahren

Deliberative Beteiligungsverfahren (auch: dialogorientierte Beteiligung) sind Verfahren für einen diskursiven Prozess, durch den eine Fragestellung kollektiv bearbeitet wird, um eine politische Entscheidung zu informieren. Teilnehmende können entweder gezielt oder mittels einer Zufallsauswahl eingeladen werden. Letzteres zielt darauf ab, dass die Zusammensetzung der Teilnehmenden einen Querschnitt der Gesellschaft abbildet (im Hinblick auf Alter, Geschlecht und Bildung). Deliberative Beteiligungsverfahren sollten in der Praxis so ausgestaltet sein, dass sie tatsächlich zu Informations- und Reflexionsgewinnen führen.

Desertifikation

ist Landdegradation in ariden, semi-ariden und trockenen sub-humiden Gebieten, die sich aus verschiedenen Faktoren wie Klimavariabilität oder menschlichen Aktivitäten ergibt (Artikel 1 der UNCCD).

Dürre

tritt auf, wenn die Niederschlagsmenge deutlich unter den normalen Werten liegt und ein ernsthaftes hydrologisches Ungleichgewicht verursacht, das die Produktionssysteme für Landressourcen beeinträchtigt (Reichhuber et al., 2022).

Einwohnerwert

ist ein in der Wasserwirtschaft gebräuchlicher Vergleichswert für die im Abwasser enthaltenen Schmutzfrachten. Ein Einwohnerwert (EW) ist das Produkt aus der Zahl der angeschlossenen Einwohner (Einwohnerzahl, EZ) und der täglich von einem Einwohner in das Abwasser abgegebenen Menge an organischen Kohlenstoffverbindungen (Einwohnergleichwert, EGW).

Evaporation

bezeichnet die Verdunstung von Wasser aus freien Oberflächen und Böden.

Evapotranspiration

ist die Summe aus direkter Verdunstung aus Boden- und Wasseroberflächen (Evaporation) und Abgabe von Wasserdampf aus der Pflanzen- und Tierwelt (Transpiration).

Fäkalcoliforme Bakterien

sind eine physiologische Gruppe verschiedener Bakterien aus der Familie der Enterobacteriaceae. Nur die Gattung *Escherichia* ist eindeutig fäkalen Ursprungs, alle anderen Gattungen können auch in der Umwelt vorkommen. Fäkalcoliforme Bakterien (FC) sind Indikatorkeime für fäkale Verunreinigungen im Wasser.

Governance

umfasst „Strukturen, Prozesse und Handlungen, durch die private und öffentliche Akteure interagieren, um gesellschaftliche Ziele zu verfolgen. Dies umfasst formelle und informelle Institutionen und damit zusammenhängende Normen, Regeln, Gesetze und Verfahren, um Politiken und Maßnahmen zu entscheiden, zu managen, umzusetzen und zu überprüfen, auf allen geographischen und politischen Ebenen von global bis lokal“ (IPCC, 2022b: 1803). Im Nachhaltigkeitskontext meint „Globale Governance“ die Institutionen, Akteure, Steuerungsprozesse und Politikinstrumente, die internationale Kooperation und Blockaden für die Transformation zur Nachhaltigkeit prägen (Pattberg und Widerberg, 2015).

Grenzen der Beherrschbarkeit

bezeichnen das Erreichen einer Schwelle, jenseits derer Mensch und Natur die Lebensgrundlagen entzogen werden bzw. in Kauf zu nehmende Risiken intolerabel hoch sind. Beispielsweise kann es in einer von massiver Wasserknappheit betroffenen Stadt oder Region dazu kommen, dass durch abnehmende Anpassungsfähigkeit und sich verengende Handlungsspielräume eine Wassernotlage entsteht und die Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden. Ziel muss sein, einen sicheren Abstand zu diesen Grenzen einzuhalten.

Grundwasser

ist unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Lithosphäre (äußerste Schicht der Erdkruste) zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeiten ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird (DIN, 1994).

Grünes Wasser

bezeichnet die für Pflanzen verfügbare Bodenfeuchte; regnet es über Landflächen, wird ein Teil des Wassers im Boden aufgenommen und steht Pflanzen zur Verfügung. Der andere Teil verdunstet oder geht über in → *blaues Wasser*.

Hocheinkommensländer

→ *Länder niedrigen und mittleren Einkommens*

Inkrementelle Anpassungsmaßnahmen

→ *transformative Anpassungsmaßnahmen*

Kipppunkt

ist ein Schwellenwert, jenseits dessen ein System sich neu organisiert und dies oft abrupt bzw. irreversibel. Beispiele sind Funktionsverluste von Ökosystemen bei Flutung oder Unterschreiten einer Toleranzschwelle der Vegetation für Bodenfeuchte (Fu et al., 2024), oder wirtschaftliche oder gesellschaftliche Einbrüche bei z. B. kritischer Wasserverknappung in Städten.

Klimaresilientes Wassermanagement

ist ein Ansatz zum vorausschauenden, systemischen und anpassungsfähigen Management lokaler, regionaler und globaler Wasserkreisläufe, das blaues und grünes Wasser zusammendenkt und insbesondere auf Klimaänderungen flexibel reagieren kann.

Kryosphäre

bezeichnet alle Formen von Eis und Schnee im Klimasystem der Erde: Meereis, Schelfeis, Landeis, Gletscher, Eiskappen, Eis der Permafrostgebiete und der saisonal gefrorenen Böden sowie Schnee (DWD, 2024).

Länder niedrigen, mittleren und hohen Einkommens

Die Weltbank ordnet Länder in vier Einkommensgruppen ein, mit jährlicher Aktualisierung basierend auf den Daten des Vorjahres (im folgenden Daten für das Fiskaljahr 2023–2024; World Bank, 2023d): Länder mit niedrigem Einkommen (Bruttonationaleinkommen pro Kopf von 1.135 US-\$ oder weniger) mit mittlerem Einkommen im unteren Bereich (1.136–4.465 US-\$) und oberen Bereich (4.466–13.845 US-\$) sowie Hoheinkommensländer (13.846 US-\$ oder höher).

Lock-in-Effekt

beschreibt das Verharren in einer bestimmten Situation aufgrund der Entscheidung für eine bestimmte Technologie. Eine Veränderung der Situation ist aufgrund hoher (Anfangs-)Investitionen oder anderer struktureller Begrenzungen unwirtschaftlich oder organisatorisch nicht zu leisten. Beispielsweise kann es zum Lock-in bestimmter Technologien kommen (→ *Pfadabhängigkeit*), wenn der spätere Wechsel zu alternativen Technologien hohe Kosten verursacht oder gesamte Produktionsketten sowie gesellschaftliche Strukturen angepasst werden müssten.

MENA-Region

Die MENA-Region (Middle East and North Africa) umfasst Algerien, Ägypten, Bahrain, Dschibuti, Irak, Iran, Israel, Jemen, Jordanien, Katar, Kuwait, Libanon, Libyen, Marokko, Oman, Saudi-Arabien, Syrien, Tunesien, die Vereinigten Arabischen Emirate sowie Westjordanland und Gaza (World Bank, 2018).

Multidimensionale Armut

ist ein Messwert für Armut, der auf dem Multidimensionalen Armutsindex des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen (UNDP) beruht. Der Armutsbegriff berücksichtigt jeweils mehrere Indikatoren aus den Bereichen Bildung, Gesundheit und Lebensstandard. Der Fokus liegt auf elementaren Mängeln, wie z. B. dem fehlenden Zugang zu langjähriger Bildung oder zu sauberem Trinkwasser (Lepenes und Sieler, 2010).

Neu entstehende Ökosysteme

(oder novel ecosystems) sind „Ökosysteme, die sich in ihrer Zusammensetzung bzw. Funktion von heutigen und früheren [Öko-]Systemen unterscheiden“ (Hobbs et al., 2009). Ihre Entstehung wird mit globalen Umweltveränderungen, insbesondere dem Klimawandel, Landnutzungsänderungen und der Verbreitung invasiver Arten, in Verbindung gebracht. Ein Beispiel ist die Entstehung postglazialer Ökosysteme infolge abschmelzender Gletscher (Bosson et al., 2023).

Ökosystem

ist ein „dynamischer Komplex von Gemeinschaften aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen sowie deren nicht lebender Umwelt, die als funktionelle Einheit in Wechselwirkung stehen“ (Artikel 2 der CBD).

Ökosystemleistungen

bezeichnet den Nutzen, den Menschen aus → *Ökosystemen* ziehen. Es wurden 18 Ökosystemleistungen identifiziert, eingeteilt in regulierende, materielle und nicht materielle Leistungen. Eine Weiterentwicklung dieses Begriffs ist das Konzept der Beiträge der Natur für den Menschen (nature's contributions to people, NCP), die „alle positiven und negativen Beiträge der lebenden Natur (...) zur Lebensqualität der Menschen“ umfassen und dabei auch den kulturellen Kontext und die Rolle indigenen und lokalen Wissens berücksichtigen (Díaz et al., 2018).

Peak Water

bezeichnet den Wendepunkt zwischen zunehmenden und abnehmenden Schmelzwasserabflüssen infolge verschwindender Gletscher (Hock et al., 2019).

Pfadabhängigkeit

ist eine Situation, in der eine laufende Entwicklung durch historische Entwicklungen oder Entscheidungen bestimmt wird und damit einem Pfad folgt, dessen Struktur sich im Lauf der Zeit verfestigt (→ *Lock-in-Effekt*). Dass sich beispielsweise eine Technologie gegenüber einer anderen am Markt durchsetzt, ist nicht unbedingt auf ihre Überlegenheit zurückzuführen, sondern kann das Ergebnis historischer Zufälle und eines sich selbst verstärkenden Prozesses sein. Die Kosten der „traditionellen“ Technik sind im Vergleich zu den Anfangsinvestitionen einer neuen Technologie niedrig, da Lerneffekte bei der Anwendung genutzt wurden und man auf kompatible Techniken und Standards zurückgreifen kann.

Rahmenabkommen

ist ein völkerrechtlicher Vertrag, mit dem sich eine möglichst große Gruppe von Staaten darauf einigt, zu einem bestimmten Thema zu kooperieren; diese sind vor allem im Umweltvölkerrecht verbreitet (Bodansky et al., 2017; Sands et al., 2018: 106). In Rahmenkonventionen werden zunächst allgemeine Definitionen, Ziele und Prinzipien festgelegt, Verpflichtungen wie wissenschaftliche Forschung, Informationsaustausch und Kooperation beschlossen sowie eine Grobstruktur für rechtliche und institutionelle Rahmenbedingungen zukünftiger Kooperation entschieden (Bodansky et al., 2017: 57). Vertragsstaatenkonferenzen bilden ein Forum zur nachfolgenden Entwicklung eines gemeinsamen rechtlichen und politischen Rahmens.

Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

Der WBGU bezeichnet Krisen, die aus dem Zusammenspiel wasserbezogener → *Verschärfungen* entstehen als „regionale Wassernotlagen“. Beispiele sind ein drohender Zusammenbruch der Wasserversorgung einer Stadt oder erhebliche Ernteausfälle durch eine Dürre. Das Ausmaß einer regionalen Wassernotlage kann so gravierend sein, dass → *Grenzen der Beherrschbarkeit* erreicht werden. Wassernotlagen lassen sich als wiederkehrende, typische Muster weltweit beobachten und haben daher oft eine planetare Dimension. Mehrere regionale Wassernotlagen können in einer planetaren Notlage (z. B. Ernährungs-krise, politische Krise) münden.

Renaturierung

ist eine Maßnahme zur substanziellen Erholung bzw. Wiederherstellung eines degradierten oder zerstörten → *Ökosystems*. Mit Renaturierung ist keine Rückkehr zu einem Ur- oder Idealzustand gemeint. Vielmehr soll der Umgang mit Ökosystemen sinnvoll ausgestaltet und in nachhaltigen Grenzen gehalten werden sowie ein Beitrag zu Klimaschutz, Klimaanpassung, Biodiversitätsschutz und -gewinn und einem → *klimaresilienten Wassermanagement* geleistet werden. Beispiele sind die Wiedervernässung von Mooren oder die Wiederherstellung natürlicher Flussläufe und Auenlandschaften.

Representative Concentration Pathways – RCPs

sind Szenarien, die im 5. Sachstandsbericht des IPCC 2014 veröffentlicht wurden. Die Representative Concentration Pathways (RCPs) enthalten exemplarische Zeitreihen klimaaktiver Gase, Aerosole und Landbedeckungen bis 2100, die zu unterschiedlich stark ausgeprägtem Klimawandel führen. Die vier RCPs – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 – sind nach ihren Strahlungsantriebswerten im Jahr 2100 benannt. Der Strahlungsantrieb bezeichnet die Änderung der Strahlungsbilanz (d. h. nach unten gerichtete abzüglich der nach oben gerichteten Strahlungsenergie pro Fläche) an der Tropopause (Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre) und ist ein Maß dafür, wie stark die Erde sich aufheizt. RCPs werden ergänzt durch → *Shared Socioeconomic Pathways*.

Resilienz

wird in verschiedenen Disziplinen unterschiedlich definiert und beschreibt eine Eigenschaft biologischer, ökologischer, sozialer oder technischer Systeme (inklusive individueller Organismen, Gruppen von Organismen sowie Organisationen). In der Regel wird Resilienz als ein Maß für die Widerstandsfähigkeit des Systems gegenüber äußeren Einwirkungen verstanden, d. h. als die Fähigkeit, nach Störungen wieder in den Ausgangszustand

zurückzukehren (oder zumindest in dessen Nähe, ohne dauerhafte qualitative Veränderungen des Systems bzw. seines Zustands oder seiner Funktionen).

Schwammstadt

ist ein Konzept der Stadtplanung, das den Rückhalt und eine möglichst umfassende Nutzung von Niederschlags- und Oberflächenwasser zum Ziel hat, um die urbane Wasserspeicherung zu verbessern, anstatt es lediglich zu kanalisieren und abzuleiten. Teil des Konzeptes ist die Schaffung urbaner Blau- und Grünräume. Ziel des Schwammstadtkonzeptes ist es, Städte resilienter gegen Wetterextreme zu machen (Hitze, Starkniederschläge, Dürren) und ein gesundes Stadtklima zu fördern.

Shared Socio-economic Pathways – SSPs

ergänzen die → *Representative Concentration Pathways (RCPs)*. Die verschiedenen Ausprägungen von Emissionen und Klimawandel, die durch die RCPs beschrieben werden, lassen sich vor dem Hintergrund unterschiedlicher sozioökonomischer Entwicklungspfade explorieren. Die fünf SSPs reichen von einem Szenario mit hoher Nachhaltigkeit (SSP1) bis hin zu einem Szenario mit hohen technologischen Innovationen bei weiterer starker Nutzung fossiler Energieträger (SSP5). Dieser integrative SSP-RCP-Rahmen wird in weiten Teilen der Literatur zu Klimaauswirkungen und Klimapolitik genutzt.

Spillover-Effekte

sind auf internationaler Ebene „die positiven oder negativen externen Effekte, die durch die Maßnahmen eines Landes auf ein anderes Land entstehen“ (SDSN, 2024a). Im Kontext der Agenda 2030 können internationale Spillover-Effekte die Bemühungen anderer Länder schwächen, z. B. wenn die Maßnahmen eines Landes einem anderen Land ökonomische oder andere Kosten, wie z. B. Umweltzerstörung, auferlegen (SDSN, 2024b).

Stationarität

beschreibt den Umstand, dass statistische Eigenschaften natürlicher Systeme innerhalb eines zeitlichen Rahmens konstant bleiben.

Subsidiaritätsprinzip

bedeutet die Wahrnehmung einer Aufgabe durch die jeweils unterste hierfür geeignete Ebene.

Summe aller gelösten Feststoffe

Die Summe der im Wasser gelösten Feststoffe (Total Dissolved Solids, TDS) wird als Maß für die Wasserverschmutzung durch Salze verwendet.

Transformative Anpassungsmaßnahmen

bezeichnen notwendige grundlegende Systemänderungen, wenn herkömmliche Ansätze bzw. inkrementelle Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels nicht mehr ausreichen. Der IPCC bezeichnet transformative Anpassung als Anpassung, bei der grundlegende Eigenschaften eines sozial-ökologischen Systems verändert werden. Inkrementelle Anpassungsmaßnahmen sind dagegen Maßnahmen, die keine grundlegende Systemänderung erfordern.

Verschärfungen wasserbezogener Probleme

Der WBGU bezeichnet als Verschärfungen wasserbezogener Probleme insbesondere die Folgen des Klimawandels für den Wasserkreislauf, das → *Wasserdargebot* und die → *Wasserqualität* sowie den steigenden menschlichen Nutzungsdruck auf Wasserressourcen, der aufgrund von ungleicher Verteilung und nicht nachhaltiger Lebensstile weiter zunehmen wird. Hinzu kommen geopolitische Verwerfungen, die einen nachhaltigen Umgang mit Wasser erschweren. Diese Verschärfungen können sich abhängig von regionalen Kontexten zu → *Wasser-notlagen* zuspitzen.

Virtuelles Wasser

bezeichnet – gemessen über die gesamte Produktionskette – die Wassermenge eines Produkts, die bei seiner Herstellung aufgenommen, verschmutzt oder verbraucht wird (z. B. weil es verdunstet; → *Wassergebrauch*). Das Konzept des virtuellen Wassers wird unter anderem genutzt, um den mit internationalem Handel in Verbindung stehenden Wasserverbrauch zu beschreiben. Beispielsweise bezeichnen die virtuellen Wasserexporte eines Landes die im Inland für die Produktion der exportierten Güter verbrauchte und verschmutzte Menge Wasser. Solche virtuellen Wasserflüsse werden auch bei der Berechnung des → *Wasserfußabdrucks* eines Landes berücksichtigt.

Wasserbedarf

ist ein Planungswert für das in einer bestimmten Zeitspanne für die Wasserversorgung voraussichtlich benötigte Wasservolumen für den Ausbau einer Wasserversorgungsanlage, z. B. Trinkwasser-, Betriebswasser-, Haushaltswasser-, Kühlwasser-, Löschwasser-, Bewässerungsbedarf, sowie der Wasserbedarf für öffentliche Einrichtungen.

Wasserbezogene Ökosysteme

sind Ökosysteme, deren Funktionen davon abhängig sind, dass ausreichend Wasser in adäquater Qualität vorhanden ist, die aber auch durch ausgeglichene Wasserspeicherung und -abgabe eine besondere Relevanz für die Erhaltung und Stabilisierung des lokalen, regionalen

oder globalen Wasserkreislaufs und Wasserhaushalts haben. Dazu zählen neben Binnengewässern und Feuchtgebieten wie Mooren auch Landökosysteme wie Wälder oder Graslandschaften.

Wasserdargebot

Das Wasserdargebot eines Gebietes ist die für eine bestimmte Zeit aus dem natürlichen Wasserkreislauf zur Verfügung stehende nutzbare Menge an Süßwasser (UBA, 2022b).

Wasserentnahme

ist die Wassermenge, die an → *blauem Wasser* entnommen wird, um den gesamten → *Wasserbedarf* zu decken. Bei ausreichendem → *Wasserdargebot* entspricht die Wasserentnahme dem Bruttowasserbedarf. Ist dies nicht der Fall, entspricht die Wasserentnahme der → *Wasserverfügbarkeit* (Bierkens und Wada, 2019).

Wasserfußabdruck

misst die mit der Produktion oder dem Konsum von Gütern und Dienstleistungen verbundene Wassermenge. Er kann auf verschiedenen Ebenen ermittelt werden, etwa für einen einzelnen Herstellungsprozess, ein Produkt, eine Firma, für den Verbrauch eines Individuum oder eines Land. Der Wasserfußabdruck eines Landes kann z. B. aus dem Wasserverbrauch im Inland, zuzüglich des Wasserverbrauchs für die Produktion von Importen im Ausland, abzüglich des → *virtuellen Wassergehalts* der Exporte berechnet werden. Der Wasserfußabdruck kann Aufschluss darüber geben, wie viel Wasser in einem bestimmten Flusseinzugsgebiet oder aus einem Grundwasserleiter verbraucht wird. Häufig wird der Wasserfußabdruck allein auf die Menge des verbrauchten Wassers (volumetrisch) bezogen.

Wasserknappheit

oder Wassermangel sind gebräuchlich, um die Herausforderung einer eingeschränkten Wasserverfügbarkeit für Mensch und Natur zu beschreiben. Der Mangel an blauem Wasser beschreibt den Zustand, in dem die Bedarfe nach Oberflächen- und Grundwasser deren Verfügbarkeit übersteigen (Savenije, 2000). Basierend auf dem Prinzip der nachhaltigen Nutzung wird es definiert als „Verhältnis zwischen gesellschaftlicher Blauwassernachfrage und verfügbarem erneuerbaren Blauwasser“. Von einem Mangel an grünem Wasser wird gesprochen, wenn die Bodenfeuchte nicht für die Produktion von Pflanzen ausreicht und Bewässerung erforderlich wird (Rosa et al., 2020).

Wassermangel

→ *Wasserknappheit*

Wasserstress

Wasserstress durch Knappheit entsteht abhängig vom Verhältnis zwischen der gesamten Süßwasserentnahme durch alle Nutzungen und den gesamten erneuerbaren Süßwasserressourcen nach Berücksichtigung des ökologischen Wasserbedarfs. Die FAO spricht im Rahmen der Agenda 2030 von Wasserstress, wenn mehr als 25 % der Süßwasserressourcen in einem Gebiet entnommen wurden (FAO und UN Water, 2021: 9).

Wasserverbrauch

bezeichnet Wasser, das aus Süßwasserressourcen entnommen wird und nach der Nutzung nicht mehr für eine weitere Verwendung zur Verfügung steht. Wasser wird durch Verdampfen oder Inkorporierung in ein Produkt verbraucht (Schulte und Morrison, 2014). Der verbleibende Teil, der in das Grundwasser bzw. die Oberflächengewässer zurückfließt, wird als Rückfluss (return flow) bezeichnet und steht für die Wassernutzung an anderer Stelle zur Verfügung. Hierbei ist jedoch oftmals die Wasserqualität beeinträchtigt (Bierkens und Wada, 2019).

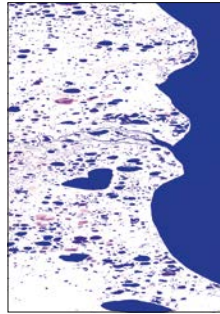
Wasserverfügbarkeit

bezeichnet das für den Menschen zugängliche Wasser.

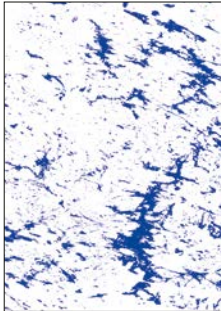
Erläuterungen zu den Kapiteleinstiegsgrafiken

Die als Einstieg der Kapitel 1–9 verwendeten Grafiken zeigen Ausschnitte hochaufgelöster Karten von Gewässerstrukturen in verschiedenen Weltregionen (Quelle: Pekel et al., 2016). Weitere Oberflächengewässer können auf der Seite des Global Surface Water Explorer erkundet werden:

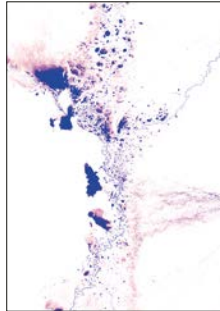
<https://global-surface-water.appspot.com>



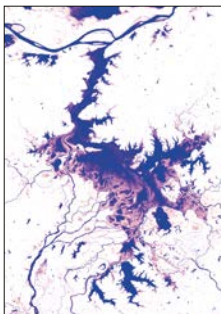
Yartik-Sale liegt auf der sibirischen Halbinsel Jamal in Russland, die zum Autonomen Kreis der Jamal-Nenzen gehört. Das Auftauen des Permafrosts durch Klimawandel, Überweidung und die Förderung großer Erdgasvorkommen verändern die Tundra, mit schwerwiegenden Folgen für die indigene Bevölkerung (Grafik zu Kap. 5).



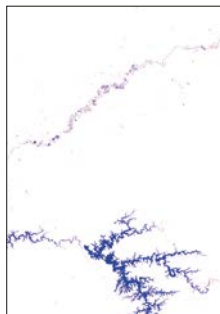
Der Pääjärvi-See ist Teil der Finnischen Seenplatte, Europas größter Seenregion. Die Region ist Lebensraum für viele Tier- und Pflanzenarten, wichtiges Erholungsgebiet und zentrale Trinkwasserquelle, u. a. für die Hauptstadt Helsinki (Grafik zu Kap. 1).



Das Biosphärenreservat Pantanal ist das größte Binnenlandfeuchtgebiet der Welt. Es liegt hauptsächlich in Brasilien, zu Teilen auch in Paraguay und Bolivien. Das artenreiche Feuchtbiotop ist einer der wichtigsten natürlichen Wasserspeicher Südamerikas (Grafik zu Kap. 6).



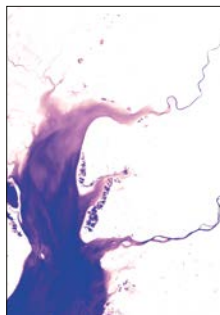
Der Poyang-See ist der größte Süßwassersee Chinas. Er schrumpft infolge von Dürren und gilt als wichtiges Sandabbaugebiet (Grafik zu Kap. 2).



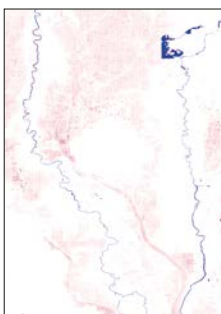
Der Rio Paraíba do Sul fließt durch dicht besiedelte und industrialisierte Gebiete Brasiliens. Er leidet unter Verschmutzung und Schadstoffbelastungen. Einige Abschnitte sind durch Dämme fragmentiert, in anderen Uferabschnitten befinden sich künstliche Seen in Folge des Sandabbaus (Grafik zu Kap. 7).



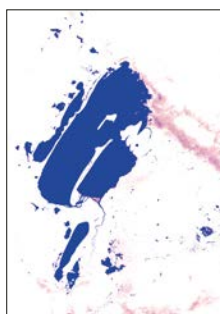
Viele Menschen im Mekong-Delta leben von der Landwirtschaft, das Delta gilt als „Reisschüssel“ Vietnams. Doch schwankende Wasserstände, Übernutzung und Ökosystemzerstörung bedrohen die Lebensgrundlagen von Natur und Menschen (Grafik zu Kap. 3).



Der Golf von Khambhat liegt an der indischen Küste im arabischen Meer. Natürliche Phänomene wie Gezeitenwechsel, aber auch ein starkes Bevölkerungswachstum in den Küstenregionen, Landnutzungsveränderungen und die Erosion der Küstenlinie stellen Herausforderungen dar (Grafik zu Kap. 8).



Der Sacramento River und der Feather River liegen im nördlichen Teil des kalifornischen Längstals (Central Valley, USA), das für seine landwirtschaftliche Produktion bekannt ist. Klimawandel und Grundwasserübernutzung gefährden die Trinkwasserversorgung in der Region (Grafik zu Kap. 4).



Der Bangweulu-See und die angrenzenden Feuchtgebiete in Sambia sind Ramsar-Gebiet und Lebensraum für eine vielfältige Flora und Fauna, insbesondere Wasservögel. Die innerhalb des Schutzgebiets lebende Bevölkerung kann die Ressourcen nachhaltig nutzen (Grafik zu Kap. 9).

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)

Der WBGU wurde 1992 im Vorfeld des Erdgipfels von Rio de Janeiro von der Bundesregierung als unabhängiges, wissenschaftliches Beratergremium eingerichtet. Der Beirat hat neun Mitglieder, die vom Bundeskabinett für eine Dauer von vier Jahren berufen werden. Der WBGU wird gemeinsam vom Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz getragen. Er wird durch einen Interministeriellen Ausschuss der Bundesregierung begleitet, in dem alle Ministerien und das Bundeskanzleramt vertreten sind. Die Hauptaufgaben des WBGU sind:

- › globale Umwelt- und Entwicklungsprobleme zu analysieren und darüber in Gutachten zu berichten,
- › nationale und internationale Forschung auf dem Gebiet des Globalen Wandels auszuwerten,
- › im Sinne von Frühwarnung auf neue Problemfelder hinzuweisen,
- › Forschungsdefizite aufzuzeigen und Impulse für die Wissenschaft zu geben,
- › nationale und internationale Politiken zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung zu beobachten und zu bewerten,
- › Handlungs- und Forschungsempfehlungen zu erarbeiten und
- › durch Presse- und Öffentlichkeitsarbeit das Bewusstsein für die Probleme des Globalen Wandels zu fördern.



9 783946 830092



ISBN 978-3-946830-09-2

