Der Einfluss von klimabedingten Feucht-Trocken-Wechseln auf mineralische Oberflächendichtungen von Deichen

Lorenz Spillecke
Antje Bornschein
Alexander Knut
Ralf Thiele

Stichworte: Deichdurchströmung, Durchlässigkeitsbeiwert, dry-wetting cycle, hydraulic conductivity

1 Kurzfassung

Gegenstand dieses Beitrags ist die Analyse etwaiger Schwachstellen einer Bemessung der Oberflächendichtung eines 3-Zonen-Deich auf der Grundlage einer konstanten hydraulischen Durchlässigkeit (k_f) als Grenzkriterium. Als Folge des Klimawandels wird neben einer Erderwärmung eine Zunahme von länger anhaltenden Extremwettersituationen prognostiziert. In Folge dessen könnte es an Oberflächendichtungen von Deichen trotz Schutzschicht zu wiederholten feucht-trocken Wechseln kommen, wodurch sich die hydraulische Leitfähigkeit des Dichtungsmaterials verändern würde.

Im vorliegenden Beitrag werden für drei typische Dichtungsmaterialien die hydraulische Durchlässigkeit nach wiederholten feucht-trocken Wechseln nach DIN EN ISO 17892-11 in der Triaxialzelle ermittelt. Die Proben wurden jeweils bei 97 % und 90 % der Proctordichte aufbereitet und 5 feucht-trocken Zyklen, durch wiederholte kapillare Sättigung und anschließender schonender Ofentrocknung über die komplette Sättigungsspannweite ausgesetzt. Zusätzlich wurde an weiteren Probekörpern die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für jeden Trocknungszyklus ermittelt.

Die hydraulische Durchlässigkeit der initial lockeren Proben ist für alle untersuchten Materialen wie erwartet höher als die der verdichteten Proben. Die

Versuche zeigen eine Erhöhung der Durchlässigkeit um bis zu 2 Zehnerpotenzen nach den feucht-trocken Wechseln. Anhand der erreichten Sättigungen je feucht-trocken Wechsel wird die Vermutung abgeleitet, dass aufgrund der feucht-trocken Wechsel die Proben auflockern und die Dichte abnimmt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Bemessung allein nach einem k_f-Wert und einer Einbaudichte möglicherweise nicht ausreichend ist, um über die gesamte Lebensdauer eines Deiches dessen Dichtheit zu gewährleisten. Eine verbesserte Materialcharakterisierung, welche dynamische Effekte mit einbezieht, könnte die Dauerhaftigkeit eines Deiches weiter verbessern. Darüber hinaus sollte der Zusammenhang zwischen Dichte und hydraulischer Leitfähigkeit noch genauer untersucht werden.

2 Einleitung

Zyklische feucht-trocken Wechsel tragen erheblich zur Veränderung der Bodeneigenschaften bei, indem sie sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die hydraulische Leitfähigkeit beeinflussen *Zhao et al. (2021), Cuisinier et al. (2020).*

Zahlreiche Studien haben die Auswirkungen von feucht-trocken Zyklen auf die hydraulische Leitfähigkeit untersucht. *Malusis et al. (2011)* zeigten, dass die hydraulische Leitfähigkeit nach zyklischem Trocknen und Sättigen eines Boden-Bentonit Gemisches um bis zu 4 Zehnerpotenzen ansteigt. Ähnliche Ergebnisse wurden von *Rao et al. (2000); Lu et al. (2015); Louati &. Trabelsi et al. (2018) und Camillis et al. (2019)* beobachtet, die signifikante Veränderungen in den hydraulischen Eigenschaften von tonigen Böden feststellten. Im Gegensatz dazu kamen Studien wie die von *Boardman und Daniel (1996)* zum Ergebnis, dass feucht-trocken Wechsel keinen Einfluss auf die initial bestimmte hydraulische Leitfähigkeit haben. Bei hochplastischen Tonen verringert sich die hydraulische Leitfähigkeit im Laufe der Zeit aufgrund der Selbstheilung *Rayhani et al. (2008)*. Der Einfluss des ersten Zyklus ist besonders ausgeprägt, während nachfolgende Zyklen zu einer elastischen Reaktion in der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit führen *Abbas et al. (2023).*

Besonders expansive Böden zeigen sich empfindlich gegenüber zyklischem Trocknen und Befeuchten *Bashir et al. (2015); Al-Mahbashi et al. (2023).* Der Feinkornanteil spielt ebenfalls eine wichtige Rolle *Puneet et al. (2020).* Auch

die Plastizität und die Quelleigenschaften von Tonen sind entscheidend, da diese die Rissbildung und die Selbstheilung beeinflussen *Rayhani et al. (2008).*

Der Grund für die Veränderung der Bodenparameter durch zyklische Befeuchtungs- und Trocknungsbelastungen ist noch nicht vollständig beschrieben. *Han et al. (2022)* und *Zhao et al. (2021)* berichteten, dass wiederholte feucht-trocken Wechsel dazu führen, dass sich Makroporen schließen und Mikroporen öffnen.

Die hydraulische Leitfähigkeit von Böden nimmt generell mit der Reduktion der verbundenen Poren während der Trocknungszyklen ab. Bei den Befeuchtungskreisläufen kann die hydraulische Leitfähigkeit jedoch teilweise wiederhergestellt werden, indem die Porenverbindung wieder aufgebaut werden *Wen et al. (2022).* Hingegen berichten *Louati & Trabelsi et al. (2018),* dass die Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit stark vom anfänglichen Verdichtungszustand des Bodens abhängt. Während der feucht-trocken Wechsel wurden lockere Proben generell dichter, was die hydraulische Leitfähigkeit verringerte, während dichte Böden lockerer wurden, was zu einer Steigerung der Leitfähigkeit führte.

Bei der Auswahl eines geeigneten Bodens für mineralische Oberflächendichtungsschichten in Deichen werden in der aktuelle Entwurfspraxis (*DWA-M 512-1 2012)* oft zwei Kriterien genannt: die hydraulischen Leitfähigkeit (k_f, kleiner als 10^{-7} m/s) und die vorgegebene Verdichtung (in der Regel 97 % der Proctordichte). In dieser Untersuchung wird erarbeitet, wieso diese statischen Grenzwerte nicht ausreichend sind, um das verwendete Bodenmaterial gegenüber klimabedingten zyklischen Effekten zu bemessen.

3 Methoden

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf Ansätze zur Untersuchung von Änderungen in der hydraulischen Leitfähigkeit. Dafür wurden Messungen der Wasserretentionskurve mit einem Hyprop-2-Gerät durchgeführt um die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach der erweiterten vereinfachten Evaporationsmethode gemäß *Peters & Durner (2008)* zu bestimmen. Die gesättigte hydraulischen Leitfähigkeit wurde in einer Triaxialzelle gemessen. Durch den Vergleich von ungesättigten und gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten wird auf Plausibilität geprüft und eine Redundanz geboten.

Drei verschiedene Böden wurden für die Untersuchungen verwendet. Alle drei Böden sind als hydraulische Oberflächendichtungen für "Drei-Zonen-Deiche" geeignet. Tabelle 1 zeigt die Bodenkategorien, die gemäß *DIN EN ISO 17892 2012* untersucht wurden.

Tabelle 1: Bodenkenngrößen

	Boden A	Boden B	Boden C
Bodenart	TL / U, t, s*	TL / S, u, t, fg'	fS, ms, u, t'
Fließgrenze [Masse %]	26.50 %	29.00 %	23.70 %
Ausrollgrenze [Masse %]	12.70 %	12.60 %	18.30 %
Sand [Masse %]	56.40 %	58.00 %	62.00 %
Schluff [Masse %]	23.10 %	26.00 %	25.00 %
Ton [Masse %]	20.50 %	16.00 %	13.00 %
Proctor Dichte [g/cm³]	1.973	2.043	1.859
Optimaler Wassergehalt	11.10 %	9.30 %	13.70 %

Vor Beginn einer Messung wurden die Proben in 250 ml großen Zylindern bei optimalem Wassergehalt hergestellt. Eine mehrschichtige Verdichtung wurde angewendet, um 97 % der Proctor-Dichte zu erreichen und damit die realen Einbaubedingungen so genau wie möglich nachzubilden. Eine zweite Probe jedes Bodens wurde mit einer geringeren Dichte von 90 % der Proctor-Dichte vorbereitet.

Die Proben wurden kapillar in einem Wasserbad gesättigt (vgl. Abbildung 1), wobei das Quellen durch Ballastieren verhindert wurde. Nach Abschluss der Sättigung wurde die Sättigungszahl berechnet.

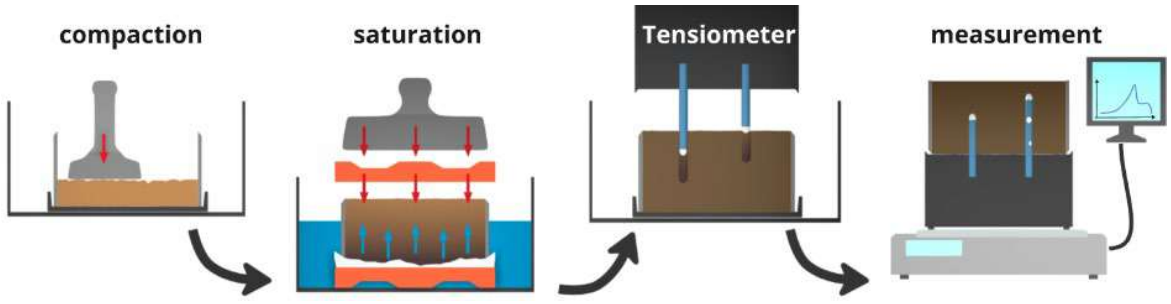

Abbildung 1: Probenvorbereitung Messung der Wasserretentionskurve

Nach jedem Trocknungszyklus bzw. jeder Messung wurde die Probe wie beschrieben erneut gesättigt. Die Methode hatte zum Ziel, den Prozess zerstörungsfrei durchzuführen. Das Verfahren wurde für insgesamt 5 Zyklen wiederholt.

Für die Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurden die Bodenproben in den gleichen 250 ml großen Zylindern hergestellt, die für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit verwendet wurden, um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten. Für eine Messung wurde die Probe in eine Triaxialzelle eingebaut. Die Messung wurde reproduzierbar gemäß der Norm *DIN EN ISO 17892-11 2021* durchgeführt. Für die Ermittlung der Durchlässigkeit nach Einbau und nach 5 feucht-trocken Wechseln wurde jeweils eine separate Probe hergestellt, da eine Messung die Probenstruktur stört.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Entwicklung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist in Abbildung 2 für zwei unterschiedlich dichte Proben dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl dichte als auch locker hergestellte Bodenproben nach wiederholten Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen signifikante Änderungen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aufweisen. Die anfängliche ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der dichten Probe wird mit $7{,}5 \cdot 10^{-11}$ m/s gemessen und steigt nach fünf Zyklen auf $1{,}9 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dieser Effekt ist bei lockeren Proben weniger ausgeprägt.

Dichte Proben erreichten im Allgemeinen initial höhere Sättigungen von etwa 97 % im Vergleich zu lockeren Proben mit 76 % und deuten daher auf eine Abhängigkeit zwischen der erreichten Sättigung durch die kapillare Sättigungsmethode und der Bodendichte hin.

Für einen besseren Vergleich sind die Maximalwerte der Sättigung und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten in Abbildung 3 gesondert dargestellt. Durch die Beobachtung einer Reduzierung der maximalen-Sättigungsgrade nach jedem Zyklus ist eine Reduzierung der Dichte durch aufeinanderfolgende feucht-trocken Wechsel wahrscheinlich. Die Annahme, dass der Boden aufgrund wiederholter feucht-trocken Zyklen eine Verringerung der Dichte erfährt, deutet darauf hin, dass die Probe mit höherer Anfangsverdichtung nach fünf Zyklen eine ähnliche Dichte erreicht hat, wie die Probe mit niedrigerer Anfangsverdichtung vor dem ersten Zyklus.

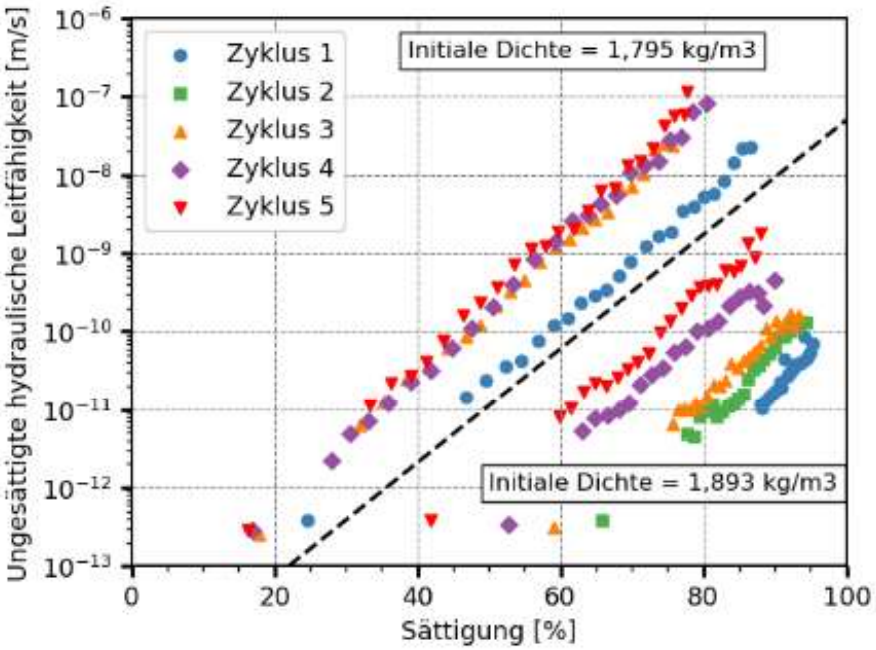

Abbildung 2: Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit von zwei Proben mit unterschiedlicher Verdichtung. Zyklus 2 für die Probe mit geringerer initialer Dichte konnte aufgrund von Messfehlern nicht dargestellt werden.

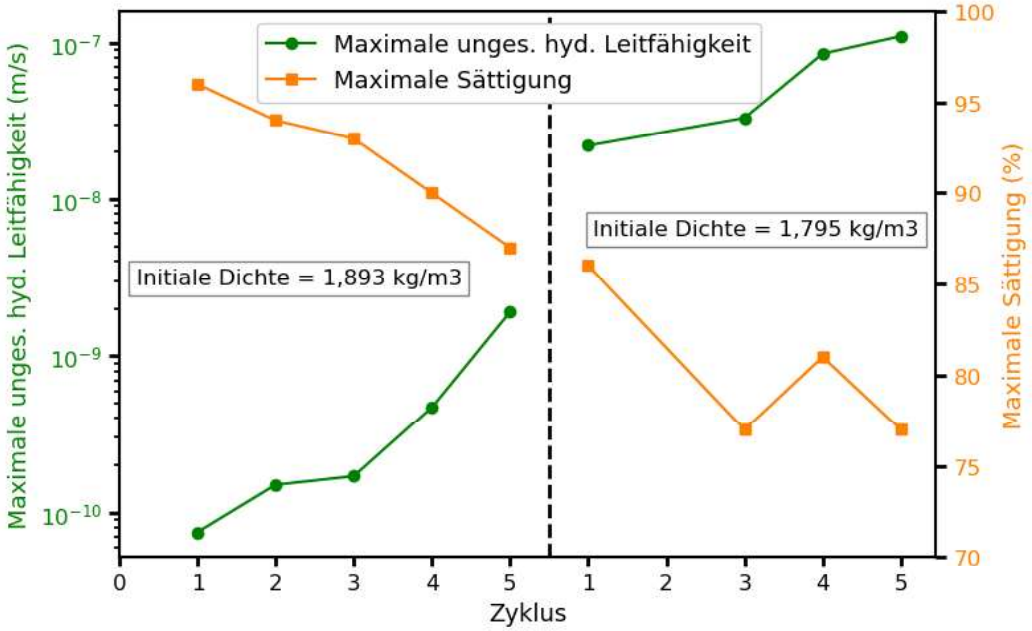

Abbildung 3: Maximale Sättigung und maximale ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, extrahiert aus den Daten in Abbildung 2.

Abbildung 4 zeigt die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Aufbereitung einer Probe und nach wiederholten feucht-trocken Wechseln. Boden A zeigt die größte Veränderung, mit einer Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit um etwa 2 Zehnerpotenzen nach 5 Zyklen im Vergleich zu keiner zyklischen Belastung. Boden C zeigte eine Zunahme um etwa ein-ein halb Zehnerpotenzen.

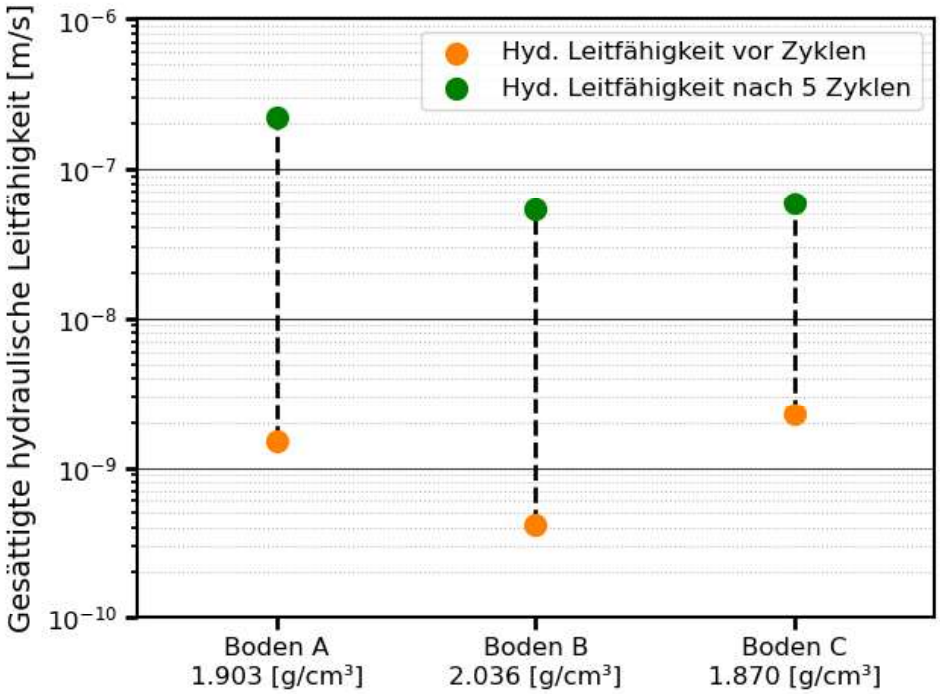

Abbildung 4: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gemäß DIN EN ISO 17892-11 2021 Werte für Boden A, B und C vor und nach 5 feucht-trocken Zyklen.

In dieser Studie fielen sowohl die hydraulische Leitfähigkeit als auch die Dichte aufgrund der Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen unter die erforderlichen Schwellenwerte nach *DWA-M 512-1 2012*. Die Integration zusätzlicher Kriterien, wie Änderungen der Porenstruktur oder Schrumpf-Quellverhalten, könnte eine umfassendere Bewertung der Bodeneignung ermöglichen.

5 Zusammenfassung

Die Studie untersuchte die Auswirkungen von feucht-trocken Wechseln auf die hydraulische Leitfähigkeit von Böden, die in Dichtungen von Deichen verwendet werden. Die Ergebnisse zeigen mehrere Erkenntnisse:

- Sowohl die ungesättigte als auch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit steigt nach fünf feucht-trocken Zyklen um bis zu dem 150-fachen an.
- Die Beziehung zwischen Sättigung und Dichte, wie in den Ergebnissen und der entsprechenden Abbildung 3 angegeben, liefert einen starken Hinweis auf strukturelle Veränderungen innerhalb des Bodens.
- Einfachere Methoden müssen untersucht werden, um das bodenspezifische, zyklische Verhalten vorherzusagen. Diese Bemühungen würden dazu beitragen, das Design, die Dauerhaftigkeit und die Lebensdauer von Deichen unter variablen Umweltbedingungen zu verbessern,
- um Dichteänderungen quantitativ zu bestimmen, sind präzise volumetrische Messungen erforderlich. Optische Methoden, zum Beispiel nicht-invasive 3D-Volumenscans, wie von *Sharanya et al. (2021)* vorgeschlagen, werden empfohlen, um Dichteveränderungen genau zu erfassen.

6 Referenzen

Al-Mahbashi AM, Elkady T, Al-Shamrani M (2023) The Role of Stress States on the Hysteric Behavior of Expansive Soil under Multiple Drying-Wetting Cycles. Buildings 13:1619.

Abbas MF, Shaker AA, Al-Shamrani MA (2023) Hydraulic and volume change behaviors of compacted highly expansive soil under cyclic wetting and drying. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 15:486–499.

Bashir Rashid, Sharma Jitendra, Stefaniak Natasja Halina (2015) Effect of Hysteresis of Soil-Water Characteristic Curves on Infiltration under Different Climatic Conditions.

Boardman B. Tom, Daniel David E. (1996) Hydraulic Conductivity of Desiccated Geosynthetic Clay Liners. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 122, No. 3.

Camillis M de, Di Emidio G, Bezuijen A, Verastegui-Flores RD (2019) Hydraulic Conductivity of Modified Bentonites After Wet and Dry Cycles. In: Zhan L, Chen Y, Bouazza A (eds) Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 2. Springer Singapore, Singapore, pp 470–480.

Cuisinier O, Masrouri F, Mehenni A (2020) Alteration of the Hydromechanical Performances of a Stabilized Compacted Soil Exposed to Successive Wetting–Drying Cycles. J. Mater. Civ. Eng. 32.

DWA-M 512-1 (2012) Dichtungssysteme im Wasserbau

Han Z, Zhao G, Lin J, Fan K, Zou W (2022) Influences of temperature and moisture histories on the hydrostructural characteristics of a clay during desiccation. Engineering Geology 297:106533.

Malusis MA, Yeom S, Evans JC (2011) Hydraulic conductivity of model soil–bentonite backfills subjected to wet–dry cycling. Can. Geotech. J. 48:1198–1211.

Louati F. & Trabelsi H., Mehrez J., Taibi S. (2018) Wet- dry cycles effect on the saturated hydraulic conductivity

Lu H, Liu J, Li Y, Dong Y (2015) Heat Transport and Water Permeability during Cracking of the Landfill Compacted Clay Cover. Journal of Chemistry 2015:1–6.

Peters A, Durner W (2008) Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Journal of Hydrology 356:147–162.

Puneet B, Burak Boluk, Leila M, Aritra B, and Anand J. P (2020) Effect of Fines on Hysteretic Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil.

Rao S.M., Reddy B.V.V., Muttharam M. (2000) The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils.

Rayhani M, Yanful EK, Fakher A (2008) Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. Engineering Geology 97:25–31.

Sharanya AG, Mudavath H, Thyagaraj T (2021) Review of methods for predicting soil volume change induced by shrinkage. Innov. Infra-struct. Solut. 6.

Wen T, Chen X, Shao L (2022) Effect of multiple wetting and drying cycles on the macropore structure of granite residual soil. Journal of Hydrology 614.

Zhao G, Han Z, Zou W, Wang X (2021) Evolution of mechanical behaviours of an expansive soil during drying-wetting, freeze–thaw, and drying-wetting-freeze–thaw cycles. Bull Eng Geol Environ 80:8109–8121.

Autoren:

M.Sc. Lorenz Spillecke

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Eilenburger Straße 15
04317 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6636
E-Mail: lorenz.spillecke@htwk-leipzig.de

Prof. Dr.-Ing. Antje Bornschein

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

Eichendorfstraße 12
04277 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6227
E-Mail: antje.bornschein@htwk-leipzig.de

Dr.-Ing. Alexander Knut

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Eilenburger Straße 15
04317 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6254
E-Mail: alexander.knut@htwk-leipzig.de

Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele

Institut für Geotechnik Leipzig
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Karl-Liebknecht-Straße 143
04277 Leipzig

Tel.: +49 341 3076 6950
E-Mail: ralf.thiele@htwk-leipzig.de