

# Persönliche PDF-Datei für Patrick Höll, Josef Kröll

Mit den besten Grüßen vom Georg Thieme Verlag

[www.thieme.de](http://www.thieme.de)

## Einfluss einer muskulären Ermüdung auf den Limb Symmetry Index nach VKB-Rekonstruktion

DOI 10.1055/a-1778-2772  
MSK 2022; 26: 105–114

Dieser elektronische Sonderdruck ist nur für die Nutzung zu nicht-kommerziellen, persönlichen Zwecken bestimmt (z. B. im Rahmen des fachlichen Austauschs mit einzelnen Kollegen und zur Verwendung auf der privaten Homepage des Autors). Diese PDF-Datei ist nicht für die Einstellung in Repositorien vorgesehen, dies gilt auch für soziale und wissenschaftliche Netzwerke und Plattformen.

### Copyright & Ownership

© 2022. Thieme.  
All rights reserved.  
Die *Muskuloskeletale Physiotherapie* ist  
Eigentum von Thieme.  
Georg Thieme Verlag KG,  
Rüdigerstraße 14,  
70469 Stuttgart,  
Germany  
ISSN 2701-6986

Nachdruck nur  
mit Genehmigung  
des Verlags



# Einfluss einer muskulären Ermüdung auf den Limb Symmetry Index nach VKB-Rekonstruktion

Quasi-Experimentelle Studie

## Effects of Muscular Fatigue on the Limb Symmetry Index after ACL Reconstruction

Quasi-Experimental study

### Autoren

Patrick Höll<sup>1,2</sup>, Josef Kröll<sup>2</sup>

### Institute

- 1 fortis – Studio für Therapie und Training, Freiburg
- 2 Interfakultärer Fachbereich für Sport- und Bewegungswissenschaft, Paris-Lodron-Universität Salzburg

### Schlüsselwörter

Vorderes Kreuzband, Return to Sport, Limb Symmetry Index, Ermüdung

### Key words

anterior cruciate ligament, Return to Sport, Limb Symmetry Index, fatigue

eingereicht 12.07.2021

akzeptiert 08.08.2021

### Bibliografie

MSK – Muskuloskeletale Physiotherapie 2022; 26: 105–114

DOI 10.1055/a-1778-2772

ISSN 2701-6986

© 2022. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,  
70469 Stuttgart, Germany

### Korrespondenzadresse

Patrick Höll  
Zähringerstraße 387  
79108 Freiburg  
Deutschland  
patrick.hoell@fortis-freiburg.eu

### ZUSAMMENFASSUNG

Auch wenn Athlet\*innen die Return to Sport (RTS) Kriterien nach einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion (VKBR) erfüllen, erleiden sie dennoch häufig eine erneute Verletzung des vorderen Kreuzbandes (VKB). Ein Grund für das erhöhte Risiko könnte darin bestehen, dass die Kriterien nicht unter ermüdeten Bedingungen getestet werden, obwohl eine muskuläre Ermüdung ein Risiko für Verletzungen darstellt. Das Ziel dieser

Studie war es, den Einfluss einer muskulären Ermüdung auf den Limb Symmetry Index (LSI) bei Athlet\*innen nach einer VKBR und gesunden Proband\*innen zu untersuchen.

Neun Proband\*innen nach einer unilateralen VKBR und 17 Gesunde ( $28,1 \pm 5,2$  LJ.) absolvierten eine Serie von 3 Sprungtests – Side Hop Test (SH), Single Leg Vertical Jump (SLVJ), Single Leg Hop for Distance (SLHD) – in einem nicht ermüdeten und einem muskulär ermüdeten Zustand. Mittels einer  $2 \times 3$  ANOVA mit Messwiederholung wurden die LSI-Werte vor und nach der muskulären Ermüdung miteinander verglichen.

Die VKBR-Gruppe erreichte im Gesamt-LSI  $91,3 \pm 12,3\%$ , die Kontrollgruppe  $100,1 \pm 11,9\%$ . Innerhalb der Gruppen bestand kein signifikanter Unterschied zwischen dem ermüdeten und nicht ermüdeten Zustand. Es konnten keine signifikanten Interaktionseffekte ( $p > 0,05$ ) oder Zeiteffekte ( $p > 0,05$ ) des LSI hinsichtlich der Ermüdung festgestellt werden, jedoch zeigten der LSI des SLVJ und der Gesamt-LSI hoch signifikante Gruppeneffekte ( $p = 0,003$ ,  $p = 0,001$ ). Patient\*innen nach einer VKBR wiesen niedrigere LSI-Werte als die gesunde Kontrollgruppe auf. Der geringere LSI der VKBR-Gruppe kann einen möglichen Risikofaktor für eine Wiederverletzung darstellen.

Eine muskuläre Ermüdung hatte keinen signifikanten Einfluss auf den LSI. Ein LSI unter ermüdeten Bedingungen scheint somit als RTS-Kriterium ungeeignet zu sein. Der bisherige Cut-off-Wert des LSI von 90% sollte in Frage gestellt und eine Erhöhung dieses Grenzwertes in Betracht gezogen werden.

### ABSTRACT

Even when athletes meet the criteria for a Return to Sports (RTS) after a reconstruction of the anterior cruciate ligament (ACLR), they often suffer renewed injuries of the anterior cruciate ligament (ACL). One of the reasons for the increased risk could be that the criteria are not tested under fatigue conditions, although muscular fatigue is a known injury risk. It was the aim of this study to investigate the effects of muscular fatigue on the Limb Symmetry Index (LSI) in athletes after ACLR and healthy subjects.

Nine subjects after unilateral ACLR and 17 healthy subjects ( $28.1 \pm 5.2$  YO) performed a series of 3 jump tests – Side Hop

Test (SH), Single Leg Vertical Jump (SLVJ), Single Leg Hop for Distance (SLHD) – in a non-fatigued and a muscularly fatigued state. LSI values before and after muscular fatigue were compared using  $2 \times 3$  ANOVA with repeat measurements.

The ACLR group achieved overall LSI values of  $91.3 \pm 12.3\%$ , compared to  $100.1 \pm 11.9\%$  for the control group. Within the groups, there were no significant differences between the fatigued and the non-fatigued state. No significant interaction ( $p > 0.05$ ) or time effects ( $p > 0.05$ ) of the LSI showed with

regard to fatigue, but highly significant group effects were observed for both the LSI of the SLVJ ( $p = 0.003$ ) and the overall LSI ( $p = 0.001$ ). Patients after ACLR demonstrated lower LSI values than healthy subjects. Lower LSI values of the ACLR group may constitute a potential risk factor for renewed injuries.

Muscular fatigue had no significant effect on the LSI. Consequently, the LSI under fatigue conditions seems unsuitable as a criterion for RTS. The previous LSI cut-off value of 90% should be called into question and an increase of this limit considered.

## Einleitung

Bis zu 30% der Athlet\*innen, die innerhalb der ersten 24 Monate nach einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion (VKBR) zu „Level I“-Sportarten – Sportarten mit schnellen Richtungswechseln und Rotationsbelastungen, wie Fußball oder Ski Alpin – zurückkommen, erleiden eine erneute Verletzung des vorderen Kreuzbandes (VKB) [1][2]. Die Entscheidung, Sportler\*innen für die Rückkehr zum Sport freizugeben, stellt Kliniker\*innen vor große Herausforderungen. Es existiert momentan kein Goldstandard, um die Bereitschaft für Return to Sport (RTS) zu beurteilen [3][4], einige Autor\*innen empfehlen für den RTS-Entscheidungsprozess eine Kombination aus zeitbasierten und funktionellen Kriterien [1][5].

Das am häufigsten genutzte Kriterium zur Beurteilung funktionseller RTS-Tests ist der Limb Symmetry Index (LSI). Dieser kalkuliert die Differenz der Werte beider Beine und kann somit Hinweise auf mögliche Seitendefizite geben [6][7][8]. Der gängige Cut-off-Wert für den LSI wird mit  $\geq 90\%$  beschrieben [4][5], wobei einige Autor\*innen einen höheren Wert empfehlen, da sie ein 10%iges Seitendefizit als nicht ausreichend ansehen [3]. McGrath et al. [9] und van Melick et al. [10] raten dazu, den Cut-off-Wert auf bis zu 95% anzuheben. Thomeé et al. [11] empfehlen für Kontaktsportarten und Sportarten mit Rotationsbelastungen sogar einen Wert von 100%, also keinen Seitenunterschied zwischen betroffener und nicht betroffener Seite. Zudem könnte es sein, dass die Athlet\*innen zwar einen LSI von  $\geq 90\%$  erreichen, aber die Funktionsfähigkeit des operierten Beines überschätzt wird, da nach einer VKB-Verletzung auch in dem nicht betroffenen Bein Kraftdefizite nachgewiesen werden [12][13]. Die verminderte Kraft des nicht betroffenen Beins verfälscht in diesem Fall die Aussagekraft des LSI und daher auch die Einschätzung der Funktionsfähigkeit des betroffenen Beins. Da bislang nur wenige alters-, geschlechts- und sportartangepasste Normwerte vorliegen und Preinjury-Daten der Athlet\*innen ebenfalls selten vorhanden sind, ist dennoch die Verwendung des LSI momentan der gebräuchliche Weg, die RTS-Bereitschaft nach einer VKBR zu beurteilen [3].

Aufgrund der hohen Inzidenzrate an rezidivierenden Kreuzbandverletzungen besteht die Notwendigkeit, die vorhandenen RTS-Kriterien genauer zu evaluieren [14] sowie den optimalen Cut-off-Wert und die Validität des LSI als Bewertungskriterium für den RTS-Entscheidungsprozess in Studien weiter zu untersuchen [12][13][15].

Die gegenwärtigen RTS-Testverfahren werden üblicherweise in einem nicht ermüdeten Zustand durchgeführt [3]. Verletzungen der unteren Extremität treten allerdings oftmals am Ende der Spielzeit auf [16][17], weshalb eine Korrelation zwischen Verletzun-

gen und einer muskulären Ermüdung [17][18] möglich erscheint. Neben dem Einfluss auf die Propriozeption und die neuromuskuläre Kontrolle [19], führt eine muskuläre Ermüdung vor allem zu biomechanischen Veränderungen [20][21][22], die zu einem gesteigerten Risiko für eine Kreuzbandverletzung führen [23]. Die Ergebnisse von Okoroa et al. [24] zeigen jedoch, dass die Anzahl der gespielten Minuten und somit die potenzielle Ermüdung kein erhöhtes Risiko für Kreuzbandrisse bei professionellen Basketballspielern der National Basketball Association darstellt. Mehrere Autor\*innen empfehlen jedoch, die RTS-Tests und den LSI in einem ermüdeten Zustand zu überprüfen, um einen realistischeren Ansatz zu gewährleisten [3][7][10]. Athlet\*innen, welche die Kriterien für RTS nach einer VKBR erfüllen, erreichen diese möglicherweise nicht unter ermüdeten Bedingungen und werden somit einem hohen Wiederverletzungsrisiko ausgesetzt [10].

Bislang haben nur wenige Studien den Einfluss einer muskulären Ermüdung auf RTS-Testverfahren und den LSI untersucht [10][25][26]. Deshalb besteht das Ziel der vorliegenden Studie darin, den Einfluss einer muskulären Ermüdung auf den LSI zu untersuchen.

## Methodik

### Studiendesign und Proband\*innen

Für die Studie wurde ein quasi-experimentelles Design mit einer Experimentalgruppe (VKBR) und einer Kontrollgruppe (Gesunde) gewählt. Beide Gruppen absolvierten Pre-Tests mit anschließender Intervention (Ermüdung) und Post-Tests. Die Studie wurde in einer physiotherapeutischen Praxis durchgeführt. Die Rekrutierung der Proband\*innen erfolgte über einen Praxisaushang und über die Homepage der Praxis. Des Weiteren wurde der Praxisaushang an physiotherapeutische und ärztliche Einrichtungen per Mail versandt. Anfangs waren 20 gesunde Proband\*innen und aufgrund erschwerter Rekrutierung sowie Dauer der Studie 10 Proband\*innen nach einer VKBR geplant. Aufgrund der Corona-Situation nahmen letztlich insgesamt 26 Proband\*innen im Alter von 19–37 Jahren im Zeitraum von Dezember 2019 bis August 2020 an der Studie teil.

Die Proband\*innen wurden in eine VKBR-Gruppe und eine Kontrollgruppe unterteilt. Zu den Einschlusskriterien der VKBR-Gruppe gehörte eine operativ versorgte vordere Kreuzbandplastik im Zeitraum von bis zu 18 Monaten postoperativ, sowohl mit als auch ohne Begleitpathologie, und die RTS-Freigabe zur uneingeschränkten sportlichen Aktivität durch die behandelnden Ärztinnen/Ärzte oder Physiotherapeut\*innen. Die Ausschlusskriterien waren eine kontralaterale VKB-Verletzung oder Ruptur sowie weitere aktuel-

le Verletzungen der unteren Extremität. Ausschlusskriterien für die gesunde Kontrollgruppe waren ein vorderer Kreuzbandriss oder sonstige schwerwiegende Verletzungen des Kniegelenks in der Vergangenheit sowie aktuelle Beschwerden oder Verletzungen des Hüft-, Knie- und Sprunggelenks in den vergangenen 12 Monaten.

Die Beindominanz wurde anhand der Frage „Wenn du einen Ball zielgerichtet kicken müsstest, welches Bein würdest du nehmen?“ bestimmt [27].

Zur Evaluierung der körperlichen und sportlichen Aktivität der Teilnehmenden wurde die Tegner Activity Scale (TAS) [28][29] verwendet. Bei der TAS handelt es sich um eine 11-stufige Bewertungsskala von 0–10 Punkten, welche die Alltagsaktivitäten bis hin zu Aktivitäten auf höchstem Level im Wettkampfsport bei Patient\*innen nach einer Kreuzbandverletzung erfasst (0 = geringste Aktivität, 10 = höchste Aktivität bezüglich der Kniebelastung). Im Rahmen dieser Studie wurde die valide und reliable deutsche Version von Wirth et al. [30] angewandt.

## Tests und Messgeräte

In Anlehnung an die Studien von Davies et al. [31] und Thomeé et al. [11] wurden der Side Hop Test (SH), Single Leg Vertical Jump (SLVJ) und Single Leg Hop for Distance (SLHD) zur Überprüfung der Sprungleistungen verwendet. Diese Sprungtests sind praktikabel, werden häufig in RTS-Testbatterien eingesetzt [6][8][10] und weisen eine hohe bis sehr hohe Test-Retest-Reliabilität auf [32][33]. Die Tests wurden anhand der Beschreibungen von Gustavsson et al. [6] sowie Kockum et al. [32] durchgeführt.

### Side Hop Test

Die Versuchsperson steht auf dem zu testenden Bein und hat die Hände seitlich in die Hüften gestützt. In einem Zeitraum von 30 Sekunden muss sie über einen Abstand von 40 cm so viele Seitsprünge wie möglich absolvieren. Die Anzahl der erfolgreichen Sprünge, d. h. jene, die die Linie nicht berühren, werden gezählt. Der Test weist mit einem Intraclass Correlation Coefficient (ICC) von 0,87–0,93 [6] bzw. von 0,84–0,96 [32] eine hohe bis sehr hohe Test-Retest-Reliabilität auf.

In dieser Studie wurde der Side Hop Test modifiziert. Nach dem Ermüdungsprotokoll würde sich das Bein, das in dem 30 Sekunden dauernden Intervall nicht springt, erholen und somit das Ergebnis verfälschen. Um den Ermüdungseffekt auszugleichen, wurde daher die Variante A-B-B-A gewählt, mit einem Sprungintervall von jeweils 20 Sekunden und 10 Sekunden Pause (Bsp.: A = rechtes Bein, B = linkes Bein). Für diesen vom Autor modifizierten Test liegen keine Reliabilitätsstudien vor. Der Test wurde gefilmt, um mittels der Coach's Eye App (TechSmith Corporation) in Slow Motion die Anzahl der korrekten Sprünge zu zählen. Als Abstandsmarkierung wurde eine dafür erstellte Matte mit einem 40 × 40 cm großen Quadrat verwendet (► **Abb. 1**).

### Single Leg Vertical Jump (SLVJ)

Der SLVJ wird als Countermovement Jump durchgeführt. Die Versuchsperson steht auf dem zu testenden Bein und hat die Hände seitlich in die Hüften gestützt. Sie beugt das Knie und springt anschließend sofort nach oben. Ziel ist es, so hoch wie möglich zu springen. Mit einem ICC von 0,89–0,97 [6] bzw. 0,98 [32][33] weist der Test eine sehr hohe Test-Retest-Reliabilität auf.



► **Abb. 1** Side Hop Test. Während 30 Sekunden absolviert der Proband auf einem Bein seitliche Sprünge, ohne die Linie des 40x40cm großen Quadrats zu berühren. Der Test wird gefilmt und die Anzahl der korrekten Sprünge mittels der Coach's Eye App gezählt. Quelle: © P. Höll

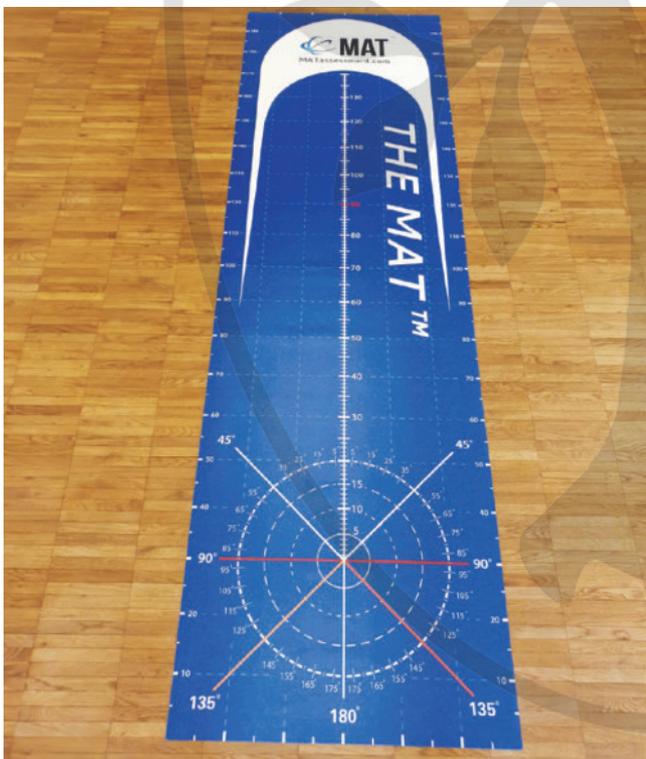
Mit einer softwarebasierten Kontaktmatte (ISHE-Messmethoden für Sportdiagnostik) wurde die Flugzeit des SLVJ gemessen. Um keine Verfälschung der Flugzeit zu bewirken, musste das Knie der Versuchsperson in der Luft gestreckt bleiben (► **Abb. 2**). Die Software wandelte die Flugzeit in Sprunghöhe in Zentimeter um. Pro Seite wurden 3 Sprünge gemessen. Die Messung der Flugzeit mit einer Kontaktmatte liefert valide und reliable Ergebnisse [34] und eignet sich dementsprechend für eine zuverlässige Berechnung der Sprunghöhe [35].

### Single Leg Hop for Distance (SLHD)

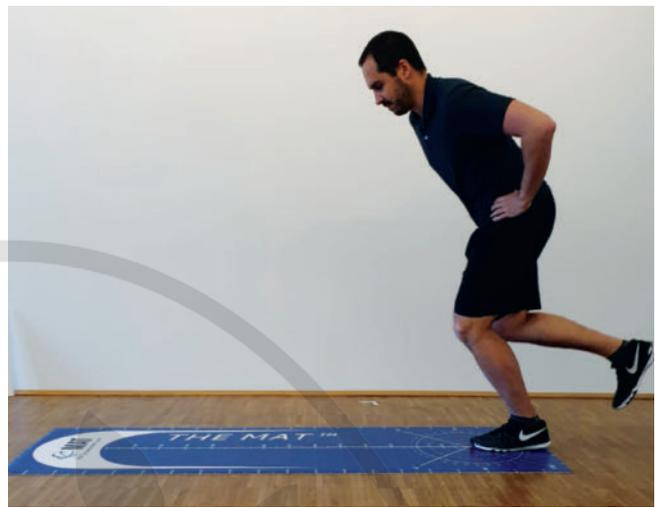
Die Versuchsperson steht auf dem zu testenden Bein mit den Zehen hinter der Markierung auf der Matte und hat die Hände seitlich in die Hüften gestützt (► **Abb. 3**). Ziel ist es, so weit wie möglich zu springen und auf demselben Bein kontrolliert zu landen und für mindestens 2 Sekunden stehen zu bleiben. Die Distanz von der Markierung bis zur Ferse in der Landeposition wird in Zentimetern gemessen. Bei einem Zwischensprung oder beim Lösen der Hände von den Hüften wird der Sprung als ungültig erklärt. Der Test wird so oft durchgeführt, bis 3 erfolgreiche Sprünge mit jedem Bein absolviert werden. Mit einem ICC von 0,94–0,95 [6] bzw. 0,97 [32][33] präsentiert dieser Test eine sehr hohe Test-Retest-Reliabilität. Der SLHD wurde auf einer Sprungmatte (The MAT Movement Assessment Tool), welche Sprünge von bis zu 140 cm ermöglicht, durchgeführt (► **Abb. 4**). Bei den Teilnehmenden, die weiter als 140 cm gesprungen sind, wurde zusätzlich ein Maßband angelegt.



► **Abb. 2** Single Leg Vertical Jump. Der Proband springt auf einem Bein nach einer Kniebeuge so hoch wie möglich und hält in der Luft das Knie gestreckt. Gemessen wird die Höhe des Sprungs mittels der softwarebasierten Kontaktmatte. Quelle: © P. Höll



► **Abb. 4** Sprungmatte, die für den Sprungtest „Single Leg Hop for Distance“ genutzt wurde. Quelle: © P. Höll



► **Abb. 3** Ausgangsposition für den Sprungtest „Single Leg Hop for Distance“. Quelle: © P. Höll

### Ermüdungsprotokoll

Nach der Empfehlung von Santamaria et al. [20] wurde ein Ermüdungsprotokoll gewählt, welches das kardiovaskuläre und motorische System beeinflusst. Es bestand aus einer Übungsserie von 10 Shuttle Sprints über eine Distanz von 7 Metern, gefolgt von 12 alternierenden Split Squats, 30 alternierenden Tippsprüngen auf ein Step-up und anschließend 10 Countermovement Jumps [23].

Um sicherzustellen, dass jede Versuchsperson adäquat ermüdete, musste das Protokoll mit einer Intensität von 90 % der maximalen Herzfrequenz durchgeführt werden. Zur Überwachung der Herzfrequenz trugen die Proband\*innen einen Herzfrequenzsensor (Polar H10), der per Bluetooth und GPS die Daten an die zugehörige Polar Beat App sendete.

Die Übungsserie wurde so oft wie möglich wiederholt, bis die Versuchsperson vollständig ermüdet war. Die Abbruchkriterien bestanden einerseits aus einer kardiovaskulären oder muskulären Erschöpfung der Proband\*innen, die daher selbstständig das Protokoll abbrechen. Andererseits erfolgte ein Abbruch durch den Untersucher, wenn die Herzfrequenz aufgrund fortgeschrittener Ermüdung für eine gewisse Zeit nicht mehr die erforderlichen 90 % erreichte oder die Bewegungsqualität bei der Übungsausführung stark nachgelassen hatte.

Ergänzend zur objektiven Messung der Ermüdung über die Herzfrequenz wurde direkt im Anschluss an das Ermüdungsprotokoll das subjektive Belastungsempfinden mithilfe der Borg-Skala (RPE) überprüft [36].

### Durchführung

Die Untersuchungen fanden an 2 Terminen statt. Der Zeitraum zwischen beiden Terminen betrug 7 Tage. Alle Testungen wurden vom Autor durchgeführt.

### Erster Termin

Zu Beginn wurde ein standardisiertes Aufwärmprogramm durchgeführt. Dieses bestand aus 5 Minuten Joggen auf einem Laufband mit einer Intensität von 70 % der maximalen Herzfrequenz, gefolgt von 10 Squats, 10 Calf Raises, 10 Countermovement Jumps und je

5 einbeinigen Sprüngen nach vorne und zur Seite. Anschließend wurden die 3 Sprungtests instruiert und geübt, um eine Gewöhnung an die Tests zu erreichen sowie den Ablauf kennenzulernen („Fam Session“). Danach wurde das Ermüdungsprotokoll bis zum Abbruch („all out“) durchgeführt und somit die individuelle Zeit bis zur vollständigen Ermüdung erfasst („all out“-Zeit).

### Zweiter Termin

Beim 2. Termin wurden 3 Testserien (Pre-Test, Post-Test 1, Post-Test 2) und das Ermüdungsprotokoll bis zu 50 % und 100 % der „all out“-Zeit durchgeführt (► **Abb. 5**). Eine Testserie bestand aus dem modifizierten Side Hop Test, dem SLVJ und SLHD, die stets in derselben Reihenfolge absolviert wurden.

Die Patient\*innen der VKBR-Gruppe starteten jeweils mit der nicht operierten Seite, während bei der Kontrollgruppe eine Randomisierung mittels Münzwurfes vor jedem Test stattfand, um zu entscheiden, welches Bein beginnt.

Zunächst erfolgte das standardisierte Aufwärmprogramm. Anschließend erfolgte die erste Testserie (Pre-Test) im nicht ermüdeten Zustand. Danach wurde das Ermüdungsprotokoll bis zur Hälfte der individuellen Ermüdungszeit (50 % der „all out“-Zeit) durchgeführt. Direkt im Anschluss erfolgte die 2. Testserie (Post-Test 1). Danach wurde das Ermüdungsprotokoll bis zur maximalen Ermüdungszeit (100 % der „all out“-Zeit) durchgeführt, worauf unmittelbar danach die 3. Testserie (Post-Test 2) erfolgte. Beim Post-Test 1 waren die Proband\*innen nicht vollständig ermüdet. Beim Post-Test 2 hingegen wurden die Tests in einem vollständig ermüdeten Zustand absolviert. Folglich wurden die Tests im Zusammenhang mit dem Verlauf der Ermüdung untersucht.

### Berechnung des LSI

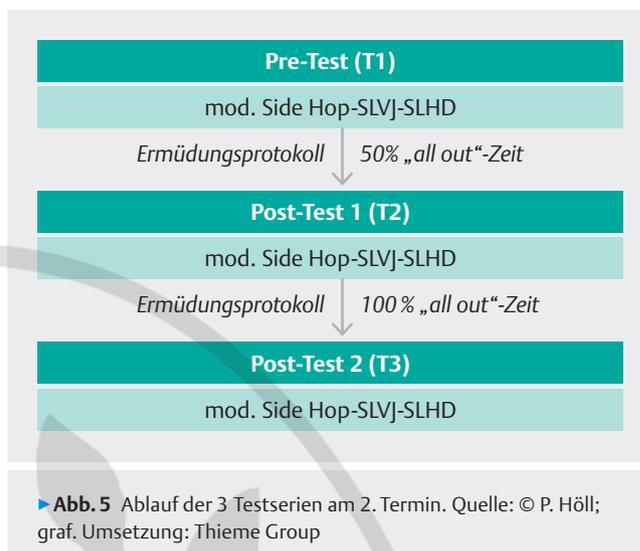
Für die VKBR-Gruppe wurden die Werte der operierten Seite durch die Werte der nicht operierten Seite dividiert und mit 100 multipliziert [8]. Für die Kontrollgruppe berechnete sich der LSI grundsätzlich aus den Werten des nicht dominanten Beines als ein Prozentsatz des dominanten Beines [9][25]. Der LSI wurde für jeden einzelnen Test (Side Hop Test, SLVJ, SLHD) und als Durchschnittswert für die gesamten Tests berechnet. Für die Kalkulation des LSI beim SLVJ und SLHD wurde jeweils der Mittelwert der 3 Messungen verwendet.

### Statistik

Die LSI-Werte wurden mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft. Für die VKBR-Gruppe sowie für die Kontrollgruppe wurde für jeden Test und den Gesamt-LSI eine einfaktorische Varianzanalyse mit Post-Hoc-Verfahren durchgeführt, um zu prüfen, ob es zu einer Zu- oder Abnahme der LSI-Werte zwischen den einzelnen Messzeitpunkten gekommen ist.

Mit einer 2 × 3 ANOVA mit Messwiederholung wurde überprüft, ob sich der LSI abhängig von einer muskulären Ermüdung (nicht ermüdet vs. 50 % ermüdet vs. 100 % ermüdet) und/oder Gruppe (VKBR vs. Kontrolle) unterscheidet.

Eine statistische Signifikanz wurde ab einem p-Wert von <0,05 akzeptiert. Die Datenanalyse erfolgte mit IBM SPSS Statistics 26 (SPSS Inc., Chicago, Illinois).



► **Abb. 5** Ablauf der 3 Testserien am 2. Termin. Quelle: © P. Höll; graf. Umsetzung: Thieme Group

### Ergebnisse

Siebzehn gesunde Proband\*innen und neun Proband\*innen nach einer unilateralen VKBR nahmen an der Studie teil. Der TAS-Mittelwert ergab  $7,1 \pm 0,9$  bei der VKBR-Gruppe und  $6,7 \pm 1,6$  bei der Kontrollgruppe. Die Proband\*innen kehrten durchschnittlich  $11 \pm 1,1$  Monate nach erfolgter VKBR zum Sport zurück, die Testungen fanden  $14 \pm 2,4$  Monate postoperativ statt. Die weiteren Charakteristika der Teilnehmenden sind in ► **Tab. 1** dargestellt.

Sowohl bei der VKBR-Gruppe als auch bei der Kontrollgruppe lag der Mittelwert der Borg-Skala nach Abbruch des Ermüdungsprotokolls („all out“-Zeit) beim 1. Termin und nach der 100%igen „all out“-Zeit beim 2. Termin jeweils bei 17, was einem Belastungsempfinden von „sehr anstrengend“ entsprach. Die VKBR-Gruppe konnte das Ermüdungsprotokoll durchschnittlich  $12,6 \pm 2,4$  Minuten durchführen, wohingegen die Kontrollgruppe eine „all out“-Zeit von  $15,7 \pm 4,8$  Minuten erreichte (► **Tab. 2**). Weitere Parameter für die Ermüdungsphase sind in ► **Tab. 2** abgebildet.

Die Absolutwerte der VKBR-Gruppe fielen durchschnittlich geringer aus als die der Kontrollgruppe. Die operierte Seite der VKBR-Gruppe zeigte im Vergleich zur nicht betroffenen Seite und zur Kontrollgruppe bei allen Tests die geringsten Werte. Sowohl bei der VKBR-Gruppe als auch bei der Kontrollgruppe fielen die Werte bei allen 3 Sprungtests im ermüdeten Zustand, verglichen mit dem Pre-Test, geringer aus.

Die LSI-Werte der jeweiligen Tests und des Gesamt-LSI sind in ► **Tab. 3** dargestellt. Bei allen 3 Tests fielen die LSI-Werte der VKBR-Gruppe geringer aus als die der Kontrollgruppe. Allerdings präsentierten beide Gruppen keine signifikante Veränderung des LSI hinsichtlich der einzelnen Messzeitpunkte. Der Gesamt-LSI für alle Tests und alle Messzeitpunkte betrug  $91,3 \pm 12,3\%$  bei der VKBR-Gruppe und  $100,1 \pm 11,9\%$  bei der Kontrollgruppe. Dies bedeutet, dass in der Kontrollgruppe das nicht dominante und dominante Bein durchschnittlich nahezu die gleichen Werte erreichten (► **Tab. 3**).

**Side Hop Test** Der LSI des modifizierten Side Hop Tests zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt ( $p = 0,385$ ,  $\eta^2 = 0,080$ , Power = 0,202), keinen signifikanten Zeiteffekt ( $p = 0,418$ ,  $\eta^2 = 0,073$ , Power = 0,187) und keinen signifikanten Gruppeneffekt ( $p = 0,082$ ,  $\eta^2 = 0,121$ , Power = 0,414) (► **Abb. 6**).

► **Tab. 1** Charakteristika der Teilnehmenden. Mittelwerte mit Standardabweichung.

Charakteristika	VKBR-Gruppe	Kontrollgruppe
n	9 (2w, 7 m)	17 (9w, 8 m)
Alter in Jahren	28,7 ± 7,1	27,8 ± 3,8
Größe, cm	176,8 ± 6,1	175,5 ± 8,8
Gewicht, kg	76,7 ± 10,5	69,4 ± 9,6
TAS	7,1 ± 0,9	6,7 ± 1,6
Beindominanz, rechts/links	8/1	15/2
Seite der VKB-Ruptur	4 rechts, 5 links	-
Verletzungsmechanismus	2 Kontakt, 7 nicht Kontakt	-
VKB-Plastik	7 Hamstring, 2 Quadrizepssehne	-
Zeitpunkt RTS, Monate postoperativ	11,0 ± 1,1	-
Zeitpunkt Testungen, Monate postoperativ	14,0 ± 2,4	-

w = weiblich, m = männlich; TAS = Tegner Activity Scale; RTS = Return to Sport

► **Tab. 2** Ermüdungsdaten. Mittelwerte mit Standardabweichung.

	VKBR-Gruppe	Kontrollgruppe
HF max.	191,3 ± 7,0	192,2 ± 3,8
90 % HF max.	172,2 ± 3,0	173,0 ± 3,4
Borg-Skala RPE, 100 % „all out“, 1. Termin	16,9 ± 0,6	17,0 ± 0,7
„all out“-Zeit, min	12,6 ± 2,4	15,7 ± 4,8

HF max. = maximale Herzfrequenz; RPE = Rating of Perceived Exertion

► **Tab. 3** LSI-Werte (MW ± SD) der VKBR-Gruppe und Kontrollgruppe für Pre-Test, Post-Test 1 und Post-Test 2.

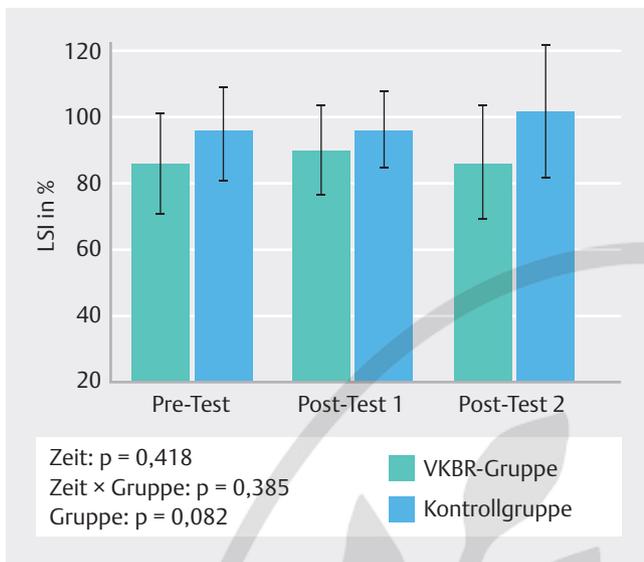
	p-Wert	Pre-Test (MW ± SD)	Post-Test 1 (MW ± SD)	Post-Test 2 (MW ± SD)
<b>VKBR-Gruppe</b>				
LSI mod. SH (%)	p = 0,829	85,9 ± 15,3	90,2 ± 13,8	86,4 ± 17,2
LSI SLVJ (%)	p = 0,905	87,9 ± 10,4	88,7 ± 10,4	90,3 ± 12,7
LSI SLHD (%)	p = 0,339	98,0 ± 6,7	99,3 ± 4,0	95,5 ± 4,4
Gesamt-LSI (%)	p = 0,775	90,6 ± 12,5	92,8 ± 11,3	90,7 ± 13,1
<b>Kontrollgruppe</b>				
LSI mod. SH (%)	p = 0,444	95,3 ± 14,3	96,4 ± 11,8	102,0 ± 20,4
LSI SLVJ (%)	p = 0,809	103,8 ± 12,2	101,4 ± 9,7	102,4 ± 9,7
LSI SLHD (%)	p = 0,456	98,9 ± 3,6	101,5 ± 6,7	99,9 ± 7,1
Gesamt-LSI (%)	p = 0,636	99,3 ± 11,7	99,8 ± 9,9	101,5 ± 13,7

LSI = Limb Symmetry Index; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; mod. SH = modifizierter Side Hop Test; SLVJ = Single Leg Vertical Jump; SLHD = Single Leg Hop for Distance; p-Wert (univariate ANOVA bzgl. des Vergleichs der einzelnen Messzeitpunkte).

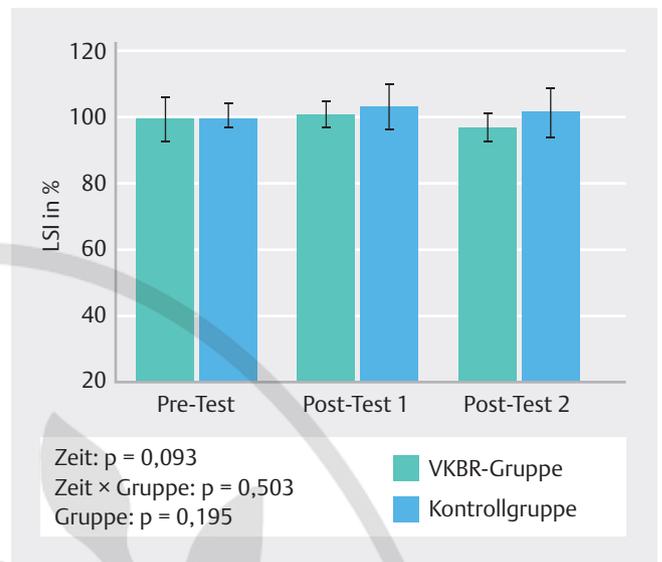
**Single Leg Vertical Jump** Der LSI des SLVJ zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt ( $p = 0,568$ ,  $\eta^2 = 0,048$ , Power = 0,134) und keinen signifikanten Effekt über die Zeit ( $p = 0,741$ ,  $\eta^2 = 0,026$ ,

Power = 0,093), jedoch einen hoch signifikanten Gruppeneffekt ( $p = 0,003$ ,  $\eta^2 = 0,309$ , Power = 0,881) (► **Abb. 7**).

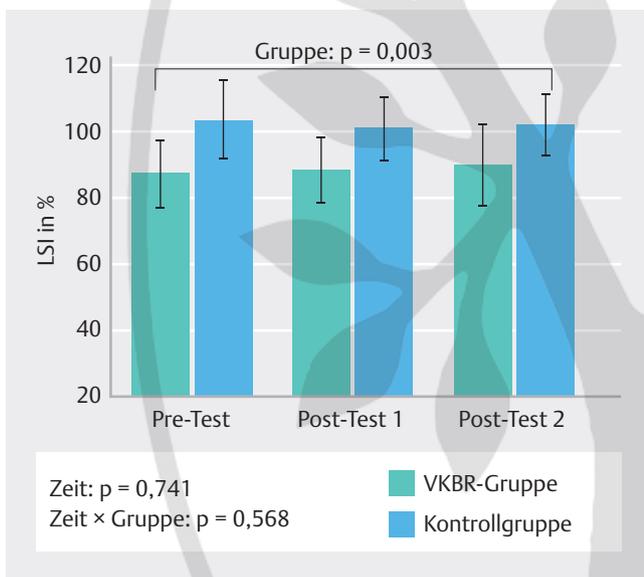
**Single Leg Hop for Distance** Der LSI des SLHD zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt ( $p = 0,503$ ,  $\eta^2 = 0,058$ , Power = 0,155),



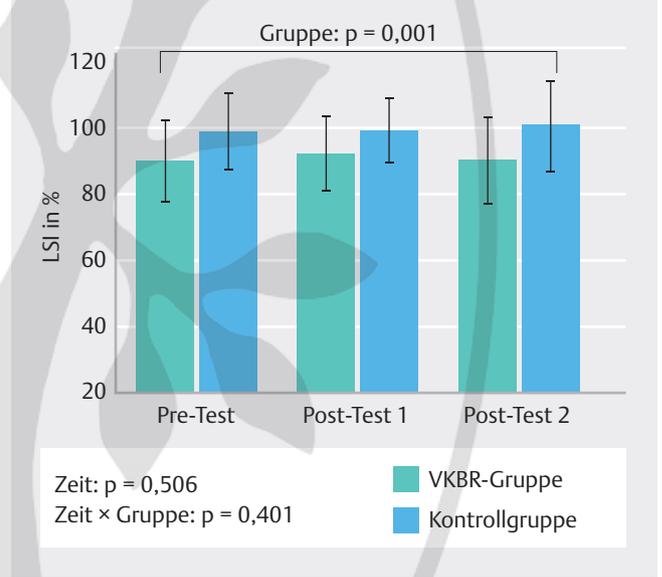
► **Abb. 6** LSI des modifizierten Side Hop Tests. Änderungen des LSI zwischen Pre-Test, Post-Test 1 und Post-Test 2 der VKBR-Gruppe und der Kontrollgruppe (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung). Quelle: © P. Höll; graf. Umsetzung: Thieme Group



► **Abb. 8** LSI des Single Leg Hop for Distance (SLHD). Änderungen des LSI zwischen Pre-Test, Post-Test 1 und Post-Test 2 der VKBR-Gruppe und der Kontrollgruppe (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung). Quelle: © P. Höll; graf. Umsetzung: Thieme Group



► **Abb. 7** LSI des Single Leg Vertical Jump (SLVJ). Änderungen des LSI zwischen Pre-Test, Post-Test 1 und Post-Test 2 der VKBR-Gruppe und der Kontrollgruppe (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung). Quelle: © P. Höll; graf. Umsetzung: Thieme Group



► **Abb. 9** Gesamt-LSI. Änderungen des LSI zwischen Pre-Test, Post-Test 1 und Post-Test 2 der VKBR-Gruppe und der Kontrollgruppe (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung). Quelle: © P. Höll; graf. Umsetzung: Thieme Group

keinen signifikanten Zeiteffekt ( $p = 0,093$ ,  $\eta^2 = 0,187$ , Power = 0,472) und keinen signifikanten Gruppeneffekt ( $p = 0,195$ ,  $\eta^2 = 0,069$ , Power = 0,249) (► **Abb. 8**).

**Gesamt-LSI** Der Gesamt-LSI zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt ( $p = 0,401$ ,  $\eta^2 = 0,024$ , Power = 0,205) und keinen signifikanten Zeiteffekt ( $p = 0,506$ ,  $\eta^2 = 0,018$ , Power = 0,162), jedoch einen hoch signifikanten Gruppeneffekt ( $p = 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,143$ , Power = 0,939) (► **Abb. 9**).

## Diskussion

In der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass eine neuromuskuläre Ermüdung einen erhöhten Risikofaktor für Verletzungen der unteren Extremität darstellt [22][23][37]. Athlet\*innen, welche die Kriterien für RTS nach einer VKBR erfüllen, erreichen diese möglicherweise nicht unter ermüdeten Bedingungen. Eine falsche Interpretation der Testwerte und eine daraus resultierende verfrühte Freigabe für RTS setzt die Athlet\*innen einem hohen Wiederverletzungsrisiko aus [10] und könnte einen möglichen Risikofaktor für

die wiederholten VKBR-Verletzungen innerhalb der ersten beiden Jahre nach erfolgter VKBR darstellen [1][2]. Mehrere Autor\*innen empfehlen, die bisherigen RTS-Kriterien zu überdenken [14] und den LSI unter ermüdeten Bedingungen zu untersuchen, um mögliche Beinasymmetrien in einem ermüdeten Zustand nachzuweisen [3][7]. Es wird davon ausgegangen, dass die Durchführung von RTS-Tests in einem ermüdeten Zustand potenzielle Asymmetrien aufdecken kann und folglich einen besseren Informationsgehalt für die Bewertung funktioneller Leistungen in der Rehabilitation darstellt.

In der vorliegenden Arbeit erfahren sowohl die Teilnehmenden nach einer VKBR als auch die gesunde Kontrollgruppe bei allen 3 Tests eine durchschnittliche Abnahme der Sprungkontakte sowie der Sprunghöhe und Sprungweite unter ermüdeten Bedingungen. Der LSI unter einer muskulären Ermüdung unterscheidet sich jedoch nicht signifikant von dem unter einem nicht ermüdeten Zustand. Daraus lässt sich schließen, dass eine muskuläre Ermüdung keinen signifikanten Einfluss auf die Beinsymmetrie hat.

Die hochsignifikanten Gruppeneffekte des Gesamt-LSI ( $p=0,001$ ) und des LSI des SLV ( $p=0,003$ ) weisen darauf hin, dass der LSI der VKBR-Gruppe, unabhängig von einer muskulären Ermüdung, deutlich geringer ausfällt als der LSI der Kontrollgruppe. Patient\*innen nach einer VKBR erreichen folglich 14 Monate postoperativ nicht dieselben LSI-Werte, die eine gesunde Kontrollgruppe vorweist, und lassen entsprechend deutliche Defizite hinsichtlich der Beinsymmetrie im Vergleich zu gesunden Proband\*innen erkennen. Basierend auf den Ergebnissen wird angenommen, dass die Differenz des LSI zwischen Personen nach einer VKBR und Gesunden und die damit verbundenen Defizite des operierten Beines eine mögliche Erklärung für die nachgewiesene hohe Wiederverletzungsrate nach einer VKBR liefern.

In den Studien von Leister et al. [25] und Augustsson et al. [26] erfuhren die Proband\*innen eine signifikante Abnahme der Sprungdistanz während des SLHD im ermüdeten Zustand, wobei Leister et al. [25] ebenfalls keinen signifikanten Unterschied bezüglich des LSI unter einer Ermüdung bei gesunden Proband\*innen feststellen konnten, zwei Drittel der Patient\*innen nach einer VKBR bei Augustsson et al. [26] jedoch einen abnormalen LSI von  $<90\%$  im ermüdeten Zustand aufwiesen. Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit führten beide Studien ein lokales Ermüdungsprotokoll der Quadrizepsmuskulatur durch und verwendeten lediglich den SLHD zur Überprüfung des LSI unter Ermüdung, was zu einer verminderten Aussagekraft dieser Ergebnisse führen kann [31]. Ein allgemeines Ermüdungsprotokoll hingegen, welches das kardiovaskuläre und motorische System beeinflusst, scheint die Anforderungen der sportlichen Umgebung besser widerzuspiegeln [20].

Trotz eines LSI-Gesamtwerts von  $91,3\%$  erreichten die Patient\*innen der VKBR-Gruppe in der vorliegenden Studie zum Teil den häufig geforderten Cut-off-Wert von  $90\%$  nicht. Diese Erkenntnisse stimmen mit den Resultaten von Holsgaard-Larsen et al. [38] und Thomeé et al. [39] überein, die zeigten, dass Defizite des operierten Beines und daraus resultierende Asymmetrien bis zu 2 Jahre nach erfolgter VKBR zu finden sind.

Die Kontrollgruppe hingegen erreichte einen LSI von  $100,1\%$ , was früheren Ergebnissen von McGrath et al. [9] entspricht, die ebenfalls keine signifikante Seitendifferenz hinsichtlich der Beindominanz bei gesunden Proband\*innen feststellen konnten. Aufgrund weiterer aktueller Studien, die ebenso hohe LSI-Werte von

$95,4\%$  [12] bis zu  $98,8\%$  [25] fanden, und hinsichtlich des hohen Gesamt-LSI der Kontrollgruppe erscheint es notwendig, den bisherigen Cut-off-Wert von  $90\%$  anzuheben, was mehrere Autor\*innen bereits empfohlen haben [9][25]. Ein strengerer Grenzwert oder keine Asymmetrie zwischen dem operierten und nicht betroffenen Bein, was einem LSI von  $100\%$  entsprechen würde, könnte dazu führen, dass Athlet\*innen nicht verfrüht mit erheblichen Defiziten zum Sport zurückkehren und dadurch die hohe Wiederverletzungsrate gesenkt wird.

Eine denkbare Überschätzung der Funktionsfähigkeit des operierten Beines, aufgrund nachweislich vorhandener Kraftdefizite der nicht operierten Seite [12][13], führte in den letzten Jahren zu einer verstärkten Kritik gegenüber dem LSI und Empfehlungen für Normwerte oder die Erhebung von Preinjury-Daten, welche in der Lage sind, genauere Daten zu liefern [8][9][13][25]. Da allerdings noch keine ausreichenden alters- und sportartspezifischen Normwerte vorhanden sind und die Erhebung von Preinjury-Werten umfassende Ressourcen benötigt [13], wird der LSI als Kriterium zur Trainingssteuerung in der Rehabilitation und für Prognosen hinsichtlich RTS herangezogen. Die Möglichkeiten seiner Verwendung im RTS-Prozess müssen dennoch überdacht und optimiert werden. Zudem sollte der LSI nicht als alleiniges Maß zur RTS-Freigabe eingesetzt werden. Da sich diese Arbeit primär mit dem quantitativen Output beschäftigte, wurden andere Testverfahren, wie etwa die Landequalität mittels Landing Error Scoring System (LESS) oder die psychologische Bereitschaft anhand des ACL-RSI nicht miteinbezogen. Allerdings stellt gerade die psychologische Bereitschaft in den letzten Jahren einen wichtigen Faktor für RTS dar und sollte in jedem Fall in einen ganzheitlichen biopsychosozialen RTS-Entscheidungsprozess integriert werden [8][40][41].

### Limitationen der Studie

Eine Reihe an Limitationen dieser Studie müssen berücksichtigt werden. Die Proband\*innen der VKBR-Gruppe wurden aus verschiedenen Praxen rekrutiert, wodurch die RTS-Freigabe anhand unterschiedlicher Kriterien bestimmt wurde. Außerdem wiesen sie unterschiedliche Erfahrungswerte hinsichtlich der Sprungtests auf.

Der für die Studie modifizierte Side Hop Test wurde in dieser Art und Weise in keiner vorherigen Untersuchung verwendet. Daher sind keine Hinweise zur Reliabilität vorhanden, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

### Schlussfolgerungen

Der LSI ermöglicht Klinikerinnen und Klinikern, Defizite zwischen beiden Beinen festzustellen, und liefert somit wichtige Hinweise für die Trainingssteuerung und die RTS-Bereitschaft. Eine muskuläre Ermüdung hat weder bei Patient\*innen nach einer VKBR noch bei gesunden Proband\*innen einen signifikanten Einfluss auf den LSI. Das Durchführen von Sprungtests unter ermüdeten Bedingungen im Hinblick auf die Beinsymmetrie bietet folglich keinen Mehrwert für die Entscheidung hinsichtlich des RTS. Eine weitere mögliche Erklärung für die hohe Wiederverletzungsrate ist der gängig gewählte Cut-off-Wert. Die Akzeptanz eines LSI Cut-off-Wertes von  $90\%$  für eine ausreichende Befähigung für RTS nach einer VKBR sollte in Frage gestellt und eine Anhebung dieses Grenzwertes in Betracht gezogen werden.

## Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Literatur

- [1] Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H et al. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2016; 50: 804–808. doi:10.1136/bjsports-2016-096031
- [2] Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC et al. Incidence of Second ACL Injuries 2 Years After Primary ACL Reconstruction and Return to Sport. *Am J Sports Med* 2014; 42: 1567–1573. doi:10.1177/0363546514530088
- [3] Dingenen B, Gokeler A. Optimization of the Return-to-Sport Paradigm After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Critical Step Back to Move Forward. *Sports med* 2017; 47: 1487–1500. doi:10.1007/s40279-017-0674-6
- [4] Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2011; 27: 1697–1705. doi:10.1016/j.arthro.2011.09.009
- [5] Grindem H, Engebretsen L, Axe M et al. Activity and functional readiness, not age, are the critical factors for second anterior cruciate ligament injury – the Delaware-Oslo ACL cohort study. *Br J Sports Med* 2020; 54: 1099–1102. doi:10.1136/bjsports-2019-100623
- [6] Gustavsson A, Neeter C, Thomee P et al. A test battery for evaluating hop performance in patients with an ACL injury and patients who have undergone ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006; 14: 778–788. doi:10.1007/s00167-006-0045-6
- [7] Steidl-Müller L, Hildebrandt C, Müller E et al. Limb symmetry index in competitive alpine ski racers: Reference values and injury risk identification according to age-related performance levels. *J Sport Health Sci* 2018; 7: 405–415. doi:10.1016/j.jshs.2018.09.002
- [8] Welling W, Benjaminse A, Lemmink K et al. Passing return to sports tests after ACL reconstruction is associated with greater likelihood for return to sport but fail to identify second injury risk. *Knee* 2020; 27: 949–957. doi:10.1016/j.knee.2020.03.007
- [9] McGrath TM, Waddington G, Scarvell JM et al. The effect of limb dominance on lower limb functional performance--a systematic review. *J Sports Sci* 2016; 34: 289–302. doi:10.1080/02640414.2015.1050601
- [10] van Melick N, van Rijn L, Nijhuis-van der Sanden MWG et al. Fatigue affects quality of movement more in ACL-reconstructed soccer players than in healthy soccer players. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2019; 27: 549–555. doi:10.1007/s00167-018-5149-2
- [11] Thomee R, Kaplan Y, Kvist J et al. Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction. *Knee Surg Traumatol Arthrosc* 2011; 19: 1798–1805. doi:10.1007/s00167-011-1669-8
- [12] Gokeler A, Welling W, Benjaminse A et al. A critical analysis of limb symmetry indices of hop tests in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: A case control study. *Orthop Traumatol Surg Res* 2017; 103: 947–951. doi:10.1016/j.otsr.2017.02.015
- [13] Wellsandt E, Failla MJ, Snyder-Mackler L. Limb Symmetry Indexes Can Overestimate Knee Function After Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Orthop Sports Phys Ther* 2017; 47: 334–338. doi:10.2519/jospt.2017.7285
- [14] Gans I, Retzky JS, Jones LC et al. Epidemiology of Recurrent Anterior Cruciate Ligament Injuries in National Collegiate Athletic Association Sports: The Injury Surveillance Program, 2004–2014. *Orthop J Sports Med* 2018; 6: 2325967118777823. doi:10.1177/2325967118777823
- [15] Capin JJ, Snyder-Mackler L, Risberg MA et al. Keep calm and carry on testing: a substantive reanalysis and critique of 'what is the evidence for and validity of return-to-sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction surgery? A systematic review and meta-analysis'. *Br J Sports Med* 2019; 53: 1444–1446. doi:10.1136/bjsports-2019-100906
- [16] Hawkins RD, Hulse MA, Wilkinson C et al. The association football medical research programme: an audit of injuries in professional football. *Br J Sports Med* 2001; 35: 43–47. doi:10.1136/bjsm.35.1.43
- [17] Harris JD, Erickson BJ, Bach Jr BR et al. Return-to-Sport and Performance After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in National Basketball Association Players. *Sports Health* 2013; 5: 562–568. doi:10.1177/1941738113495788
- [18] Brooks JH, Fuller CW, Kemp SPT et al. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am J Sports Med* 2006; 34: 1297–1306. doi:10.1177/0363546505286022
- [19] Roberts D, Ageberg E, Andersson G et al. Effects of short-term cycling on knee joint proprioception in healthy young persons. *Am J Sports Med* 2003; 31: 990–994. doi:10.1177/03635465030310064001
- [20] Santamaria LJ, Webster KE. The effect of fatigue on lower-limb biomechanics during single-limb landings: a systematic review. *J Orthop Sports Phys Ther* 2010; 40: 464–473. doi:10.2519/jospt.2010.3295
- [21] Barber-Westin SD, Noyes FR. Effect of Fatigue Protocols on Lower Limb Neuromuscular Function and Implications for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Training: A Systematic Review. *Am J Sports Med* 2017; 45: 3388–3396. doi:10.1177/0363546517693846
- [22] Gokeler A, Eppinga P, Dijkstra PU et al. Effect of fatigue on landing performance assessed with the landing error scoring system (less) in patients after ACL reconstruction. A pilot study. *Int J Sports Phys Ther* 2014; 9: 302–311
- [23] McLean SG, Fellin RE, Suedekum N et al. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 502–514. doi:10.1249/mss.0b013e3180d47f0
- [24] Okoroha KR, Marfo K, Meta F et al. Amount of Minutes Played Does Not Contribute to Anterior Cruciate Ligament Injury in National Basketball Association Athletes. *Orthopedics* 2017; 40: e658–e662. doi:10.3928/01477447-20170503-04
- [25] Leister I, Mattiassich G, Kindermann H et al. Reference values for fatigued versus non-fatigued limb symmetry index measured by a newly designed single-leg hop test battery in healthy subjects: a pilot study. *Sport Sci Health* 2018; 14: 105–113. doi:10.1007/s11332-017-0410-5
- [26] Augustsson J, Thomee R, Karlsson J. Ability of a new hop test to determine functional deficits after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2004; 12: 350–356. doi:10.1007/s00167-004-0518-4
- [27] van Melick N, Meddeler BM, Hoogboom TJ et al. How to determine leg dominance: The agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PLoS One* 2017; 12: e0189876. doi:10.1371/journal.pone.0189876
- [28] Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res* 1985; 43–49
- [29] Swanenburg J, Koch PP, Meier N et al. Function and activity in patients with knee arthroplasty: validity and reliability of a German version of the Lysholm Score and the Tegner Activity Scale. *Swiss Med Wkly* 2014; 144: w13976. doi:10.4414/smw.2014.13976
- [30] Wirth B, Meier N, Koch PP et al. [Development and evaluation of a German version of the Tegner activity scale for measuring outcome after anterior cruciate ligament injury]. *Sportverletz Sportschaden* 2013; 27: 21–27. doi:10.1055/s-0032-1330752
- [31] Davies WT, Myer GD, Read PJ. Is It Time We Better Understood the Tests We are Using for Return to Sport Decision Making Following ACL Reconstruction? A Critical Review of the Hop Tests. *Sports Med* 2020; 50: 485–495. doi:10.1007/s40279-019-01221-7

- [32] Kockum B, Heijne AI. Hop performance and leg muscle power in athletes: Reliability of a test battery. *Phys Ther Sport* 2015; 16: 222–227. doi:10.1016/j.ptsp.2014.09.002
- [33] Manske RC, Smith B, Wyatt F. Test–Retest Reliability of Lower Extremity Functional Tests after a Closed Kinetic Chain Isokinetic Testing Bout. *Journal of Sport Rehabilitation* 2003; 12: 119–132. doi:10.1123/jsr.12.2.119
- [34] Cruvinel-Cabral RM, Oliveira-Silva I, Medeiros AR et al. The validity and reliability of the “My Jump App” for measuring jump height of the elderly. *PeerJ* 2018; 6: e5804. doi:10.7717/peerj.5804
- [35] Pueo B, Lipinska P, Jimenez-Olmedo JM et al. Accuracy of Jump-Mat Systems for Measuring Jump Height. *International journal of sports physiology and performance* 2017; 12: 959–963. doi:10.1123/ijspp.2016-0511
- [36] Pires FO, Hammond J. Manipulation effects of prior exercise intensity feedback by the Borg scale during open-loop cycling. *Br J Sports Med* 2012; 46: 18–22. doi:10.1136/bjism.2010.079053
- [37] Mizrahi J, Verbitsky O, Isakov E et al. Effect of fatigue on leg kinematics and impact acceleration in long distance running. *Human Movement Science* 2000; 19: 139–151. doi:10.1016/S0167-9457(00)00013-0
- [38] Holsgaard-Larsen A, Jensen C, Mortensen NHM et al. Concurrent assessments of lower limb loading patterns, mechanical muscle strength and functional performance in ACL-patients--a cross-sectional study. *Knee* 2014; 21: 66–73. doi:10.1016/j.knee.2013.06.002
- [39] Thomeé R, Neeter C, Gustavsson A et al. Variability in leg muscle power and hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 20: 1143–1151. doi:10.1007/s00167-012-1912-y
- [40] Ardern CL, Taylor NF, Feller JA et al. Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Am J Sports Med* 2013; 41: 1549–1558. doi:10.1177/0363546513489284
- [41] Ardern CL. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction-Not Exactly a One-Way Ticket Back to the Preinjury Level: A Review of Contextual Factors Affecting Return to Sport After Surgery. *Sports Health* 2015; 7: 224–230. doi:10.1177/1941738115578131