

Return to Running (RTR) nach Rekonstruktionen des vorderen Kreuzbandes – ein narrativer Review

Return to Running (RTR) after Knee Joint Surgery: a Narrative Review

Autorinnen/Autoren

Frank Diemer^{1, 2} , Wolfgang Schoch^{2, 3} , Volker Sutor^{1, 2} , Jochen Zebisch⁴ 

Institute

- 1 DIGOTOR GbR, Brackenheim, GERMANY
- 2 QKG – Gesellschaft für Knorpelregeneration & Gelenkerhalt, Dinslaken, Germany
- 3 PULZ im Rieselfeld, Freiburg, Germany
- 4 Physio meets Science GmbH, Leimen, Germany

Schlüsselwörter

Kriterienbasierte Rehabilitation, klinische und funktionelle Kriterien, Return to running, prädiktive Validität

Keywords

Criteria-based rehabilitation, clinical and functional criteria, return to running, predictive validity

eingereicht 8.12.2025

akzeptiert nach Revision 3.2.2026

Bibliografie

Sportverl Sportschad

DOI 10.1055/a-2808-1311

ISSN 0932-0555

© 2026. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Oswald-Hesse-Straße 50,
70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Frank Diemer

DIGOTOR GbR, Austraße 30, 74336 Brackenheim, GERMANY

frank_diemer@web.de



Zusatzmaterial finden Sie unter <https://doi.org/10.1055/a-2808-1311>.

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Der Wandel von einer rein zeitbasierten hin zu einer kriterienbasierten Rehabilitation nach operativen Eingriffen am Kniegelenk hat dazu geführt, dass für einzelne Funktionen, wie z. B. dem Wiedereinstieg in Laufbelastungen, klinische und funktionelle Kriterien aufgestellt wurden. Ziel dieser narrativen Übersichtsarbeit war es, empfohlene Kriterien aus Expertenbefragungen zu extrahieren und deren prädiktive Validität darzustellen.

Methode Die Autoren führten eine Literaturrecherche in PubMed durch. Inkludiert wurden Studien, die Therapeuten und/oder Ärzte bezüglich der gängigen Praxis für einen kriterien-

basierten Wiedereinstieg in Laufbelastungen befragten. Des Weiteren wurden Arbeiten analysiert, die die Aussagekraft dieser Kriterien in klinischen Studien bei Patienten nach operativen Eingriffen am Kniegelenk evaluierten.

Ergebnisse Die Literaturrecherche ergab ausschließlich Daten für Betroffene nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. In den Expertenbefragungen wird dabei der postoperative Zeitpunkt (≥ 12 –16. Woche) am konsistentesten genannt. Darüber hinaus werden klinische (Schmerz, Schwellung) und funktionelle (Beweglichkeit, Balancetests, dynamische Kontrolltests, Krafttestung des Quadrizeps) Kriterien überbewertet. In den wenigen verfügbaren Validierungsstudien zeigen viele der aufgestellten Kriterien und deren Cut-offs eine unzureichende prädiktive Validität. Lediglich klinische Parameter (Schmerz 0–2 auf der numerischen Schmerzskala und Schwellung), ein suffizientes Range of Motion (0° Extension, 130° Flexion) und eine ausreichende Quadrizepskraft (Limb Symmetrie Index $> 60\%$ + 1,45–1,6Nm/kg) scheinen eine Aussagekraft zu haben.

Fazit Momentan in der Literatur beschriebene funktionelle Testbatterien und die entsprechenden Zielwerte im Bereich Balance und Sprungtestung sind kritisch zu sehen und sollten in zukünftigen Studien genauer überprüft werden. Bis dahin bieten sie keine verlässliche Direktive in der Entscheidungsfindung eines sicheren Wiedereinstiegs in Laufbelastungen.

ABSTRACT

Background The transition from purely time-based to criteria-based rehabilitation following knee joint surgery has led to the establishment of clinical and functional criteria for individual functions such as return to running. This narrative review aimed to extract recommended criteria from expert surveys and to present their predictive validity.

Methods The authors conducted a literature search in PubMed. Studies were included that surveyed therapists and/or physicians on current practice for criteria-based return to running. In addition, an analysis was performed on studies that evaluated the validity of these criteria in clinical trials involving patients who had undergone knee surgery.

Results The literature search yielded data exclusively for patients who had undergone anterior cruciate ligament reconstruction. In the expert surveys, the postoperative period (≥ 12 –16 weeks) was the most consistently reported criterion. Furthermore, clinical (pain, swelling) and functional (mobility, balance tests, dynamic control tests, quadriceps strength

testing) criteria are frequently recommended but lack sufficient validation. In the few validation studies available, many of the proposed criteria and their cut-off values demonstrated insufficient predictive validity. Only clinical parameters (pain 0–2 on the numerical pain scale and swelling), a sufficient range of motion (0° extension, 130° flexion) and sufficient quadriceps strength (limb symmetry index >60% + 1.45–1.6 Nm/kg) appear to be meaningful.

Conclusion Functional test batteries currently described in the literature and the corresponding target values for balance and jump testing should be viewed critically and require more rigorous evaluation in future studies. Until then, they do not provide valid guidelines for clinical decision-making regarding a safe return to running.

Einführung

Über 20 Mio. Menschen der deutschen Bevölkerung zwischen 14 und 68 Jahren laufen in ihrer Freizeit, um ihre Fitness oder ihre Gesundheit zu erhalten [1]. Laufen gehört damit zu den „Top-3-Aktivitäten“ unter den sportlichen Aktivitäten in der Allgemeinbevölkerung. Diese Affinität wird durch viele Daten aus der Literatur unterstützt. Nach Lee et al. sinkt die kumulative Mortalitätsrate durch regelmäßige Partizipation in Laufbelastungen um 25–40%, die Lebenserwartung erhöht sich um 3,2 Jahre [2]. Die Sterblichkeitsrate, bedingt durch kardiovaskuläre bzw. Krebserkrankungen, kann mit 30% und 23% ebenfalls signifikant reduziert werden [3]. Aus gesundheitlicher Sicht wird daher Laufsport als eine leitliniengerechte Option betrachtet, um ein ausreichendes körperliches Aktivitätsniveau zu sichern [4].

Andererseits erleidet eine erhebliche Anzahl der Läufer Überlastungsverletzungen. In Abhängigkeit von der Erfahrung variiert die Inzidenz zwischen 7,7/1000 Stunden Laufbelastung bei Freizeidläufern und 17,8/1000 Stunden bei Laufanfängern [5]. Vorderer Knieschmerzen bzw. das patellofemorale Schmerzsyndrom sind unter den Überlastungsverletzungen für das Kniegelenk am häufigsten [6, 7]. Ursächlich hierfür wird das Überschreiten der individuellen Belastbarkeitsgrenzen durch die beim Laufen wirkende mechanische Belastung und eine mangelhafte Trainingsplanung bzw. -progression gemacht [8].

Beschwerden im vorderen Kniegelenkbereich treten auch nach einem operativen Eingriff am Kniegelenk (z. B. Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes oder Lig. patellofemorale mediale) häufig auf [9, 10]. Sie limitieren nicht nur die Leistung im Alltag und Sport, sondern sind auch mit einem schlechteren Ergebnis in Patient-Reported Outcome Measures (PROMs) assoziiert [11, 12]. Im schlechtesten Fall gelten sie als Vorbote für eine posttraumatische Arthrose und sollten daher innerhalb der Rehabilitation eine besondere Beachtung finden [13].

Die Rückkehr zum Laufen nach ligamentären Rekonstruktionen oder knorpelregenerativen Eingriffen am Kniegelenk stellt einen wichtigen Meilenstein von den frühen Impairment-basierten hin zu sportartspezifischen Therapiezielen dar. Innerhalb einzelner Phasen wird eine Individualisierung anhand objektiver Kriterien gefordert [14]. Diese sollen den Betroffenen eine sichere Steigerung der mechanischen Belastung und Partizipation im Sport im Rahmen des Return-to-Sports-Kontinuums ermöglichen.

Im viel zitierten Scoping Review aus der Arbeitsgruppe um Alexandre Rambaud wurden Kriterien aus n = 201 inkludierten Studien extrahiert. Während in 99% der Fälle Zeiten für die Rückkehr

zum Laufen genannt wurden, zogen nur 18% Kriterien in Betracht. Leistungen aus funktionellen Testverfahren wurden mit 7% noch seltener genannt. Die Forderung nach einer zeit- und kriterienbasierten Rehabilitation wurde daher nur in weniger als einem Fünftel der Studien erfüllt. Darüber hinaus war die Auswahl an Testverfahren sowie deren Cut-off-Werte heterogen, evtl. auch bedingt durch eine fehlende Validierung [15]. Der ohnehin schon lange Translationsprozess von wissenschaftlichen Daten in die Praxis wird dadurch weiter verlängert [16].

Aus diesem Grund stehen in dieser narrativen Übersichtsarbeit 2 Hauptfragen im Vordergrund:

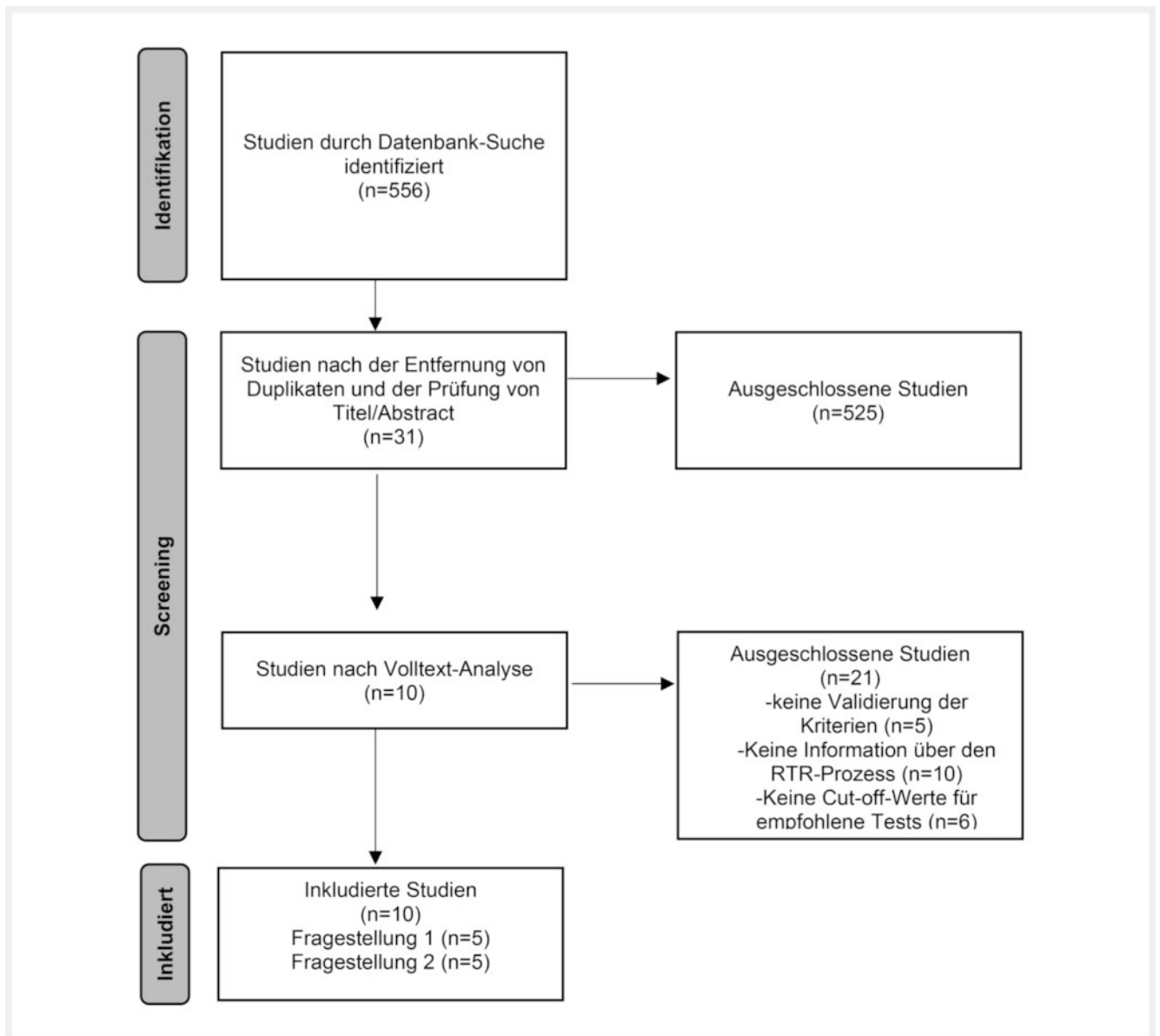
1. Welche Kriterien werden aktuell für die Rückkehr zum Laufen von Therapeuten und Ärzten empfohlen?
2. Wie gut ist die prädiktive Validität der empfohlenen Testverfahren bezüglich der Fähigkeit, beschwerdefrei zu Laufbelastungen zurückzukehren?

Methodik

Von den Autoren (FD/JZ) wurde eine systematische Literaturrecherche in MEDLINE über PubMed durchgeführt. Die kriterienbasierte Rehabilitation ist eine vergleichsweise junge Domäne. Des Weiteren ermitteln viel zitierte Übersichtsarbeiten, dass nur in ca. 20% der Studien klinische oder funktionelle Kriterien in den Entscheidungsprozess für den Wiedereinstieg in Laufbelastungen einbezogen wurden [15]. Um neue und aktuelle Evidenz zu generieren, wurde daher die Suche auf den Zeitraum nach dem Scoping Review von Rambaud et al. beschränkt [15].

Für die Fragestellung 1 wurden Befragungen von Ärzten und/oder Therapeuten bezüglich der gängigen Praxis innerhalb der Nachbehandlung von Erwachsenen nach einer ligamentären Rekonstruktion am Kniegelenk (vorderes oder hinteres Kreuzband, Lig. patellofemorale mediale) oder einem knorpelregenerativen Eingriff (autologe Chondrozytentransplantation [alle Generationen], Mikrofraktur, osteochondraler Transfer) gesucht. Inkludiert wurden ausschließlich Studien, die neben zeitbasierten Empfehlungen mindestens ein klinisches (Schmerz, Schwellung) oder funktionelles Kriterium (ROM, Kraft, posturale oder dynamische Kontrolle) sowie Ergebnisse in Patient Reported Outcome Measures berichteten.

Für die Fragestellung 2 wurden Arbeiten eingeschlossen, die die prädiktive Validität von zeitlichen, klinischen oder funktionellen Testverfahren bezüglich der Fähigkeit, beschwerdefrei zu Laufbelastungen zurückzukehren, überprüften (Forschungsfragen im



► **Abb. 1** Prisma-Schema – Ergebnisse der Literaturrecherche.

PCC-Kontext, Ein- und Ausschlusskriterien sowie Suchstrategie und Ergebnisse siehe Appendix 1).

Ergebnisse

Fragestellung 1

Zu dieser Fragestellung konnten $n=5$ Arbeiten identifiziert werden [17, 18, 19, 20, 21] (► **Abb. 1**). Alle Studien thematisierten die Nachsorge nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. Keine Daten liegen dementsprechend für andere ligamentäre Rekonstruktionen bzw. knorpelregenerative Verfahren vor. Während Glattke et al. und Vascellari et al. orthopädische Chirurgen befragten, bestand die Kohorte in den anderen Arbeiten ausschließlich aus Physiotherapeuten [17, 18, 19, 20, 21]. Kriterien

und Tests, die am häufigsten genannt bzw. von den Autoren abschließend empfohlen wurden, sind in ► **Tab. 1** zusammengefasst.

Ein gemeinsamer Nenner aller Arbeiten ist, dass der Faktor Zeit nach wie vor das dominante Kriterium ist. Konsistent wird dabei die Schwelle von ≥ 12 bzw. $\geq 12-16$ Wochen genannt. Weiter besteht Einigkeit, dass Schmerz und Schwellung gering oder nicht vorhanden sein sollten (NRS 0–1/0–2, keine oder geringe Schwellung). Ein suffizientes ROM in Flexion ($\geq 130^\circ$) und Extension (0°) stellt funktionelle Voraussetzungen dar. Diese klinischen und funktionellen Kriterien gelten schon nach Rambaud et al. grundsätzlich als „nicht verhandelbar“ [15].

Unter den neuromuskulären Testverfahren wurden u. a. der Y-Balance- bzw. modifizierte Star Excursion Balance Test (mSEBT), der Single Leg Squat (SLS), der Single Leg Hop bzw. Vertical Drop Jump sowie die Kraftwerte für den Quadrizeps und die Hamstrings

► **Tab. 1** Kriterien für den RTR nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes – Empfehlungen von Physiotherapeuten und Ärzten.

	Rambaud et al. 2018	Tortoli et al. 2024	Sayer et al. 2024	Vascellari 2020	Greenberg 2018	Glatke 2023
postoperativer Zeitpunkt (Wochen)	≥ 12	≥ 12–16	≥ 12	≥ 12	≥ 12–16	≥ 12–16
Schmerz (NRS)	<2/10	0/10	0/10	0/10	k.A.	k.A.
Schwellung	∅	∅	∅	k.A.	k.A.	k.A.
Laxität	<0,5 mm	k.A.	k.A.	n.g.	k.A.	k.A.
ROM	95% Flexion im SV** , volle Extension (0°)	> 130° Flexion, volle Extension	volles ROM	volles ROM	k.A.	k.A.
SEBT/Y-Balance-Test	≥ 90% CS	k.A.	n.g.	n.g.	≥ 90% CS, < 4 cm Asymmetrie (anterior)	≥ 80% / 90%
Single Leg Squat	0–0-45°, 10 Wh., ohne Balanceverlust und dynamischen Valgus	k.A.	k.A.	n.g.	k.A.	n.g.
Kraft Quadrizeps (LSI) isometrisch	≥ 80%	≥ 70%*	≥ 70%*	Grad 4 manuelle MFP	≥ 80%	≥ 80%*
Kraft Quadrizeps (LSI) isokinetisch	≥ 70%	≥ 70%*	≥ 70%*	n.g.	≥ 80%	≥ 80%*
Kraft Hamstrings (LSI) isometrisch	≥ 70%	≥ 70%*	≥ 70%*	n.g.	≥ 80%	≥ 80%*
Kraft Hamstrings (LSI) isokinetisch	≥ 70%	≥ 70%*	≥ 70%*	n.g.	≥ 80%	≥ 80%*
dynamische Kontrolle (Sprungtests – LSI)	≥ 70%	≥ 90%	≥ 85%	n.g.	k.A.	≥ 80% / 90%*
PROMS	n.g.	ACL-RSI, k.A.	ACL-RSI, k.A.	n.g.	n.g.	IKDCsf, k.A.

*Es wurde keine Spezifizierung bezüglich der Messapparatur bzw. Kontraktionsform vorgenommen.

**SV = Seitenvergleich; CS = Composite Score; k.A. = keine Angabe (Es werden zwar Testverfahren genannt, aber es werden keine spezifischen Cut-offs genannt.); n.g. = nicht genannt (Es werden weder Tests noch Cut-offs in der jeweiligen Kategorie genannt.); ACL-RSI = Anterior Cruciate Ligament – Return to Sport after injury.

genannt. Cut-off-Werte finden sich insbesondere für den Limb Symmetrie Index (LSI) der Kraft- und Sprungtests. Die häufigsten genannten Werte sind mit 70–80% bzw. 80–90% heterogen. Die in den einzelnen Studien beschriebene Variabilität ist noch ungleich höher. So findet man z. B. für den LSI der (isometrischen) Quadrizepskraft 70–100% bzw. 70–90% [17, 18]. Absolute Kraftwerte werden nur in der Befragung von Vascellari et al. beschrieben [19]. Hier wird innerhalb der Muskelfunktionsprüfung ein Wert größer Grad 4/5 gefordert [19].

In 4 von 5 Studien wird die Verwendung von PROMS (z. B. ACL-RSI oder IKDC-Score – subjektive Subskala) und Tests für die Laxität (z. B. vordere Schublade) empfohlen. Erstaunlicherweise finden sich keine Informationen für die Auswertung.

Fragestellung 2

Zu dieser Fragestellung konnten ebenfalls 5 Arbeiten identifiziert werden [22, 23, 24, 25].

Die prädiktive Validität für die Kraftwerte der knieumgebenden Muskulatur wurde von den Arbeitsgruppen um Iwame et al., Dauty et al. und Grondin et al. untersucht [23, 24, 25]. In ihren

Studien wurden Betroffene mit einem rekonstruierten vorderen Kreuzband nach 3 bzw. 4 Monaten bezüglich der Kraftleistung des Quadrizeps und der Hamstrings isokinetisch untersucht. Danach wurden die Patienten einer 1-maligen Laufbelastung ausgesetzt bzw. in ein Return-to-Running-Programm überführt [23, 24, 26]. In Regressionsanalysen wurden dann signifikante Prädiktoren berechnet, die ein Merkmal von erfolgreichen Rückkehrern darstellten. Der Terminus „erfolgreich“ wurde durch die Realisierung einer zuvor bestimmten Laufgeschwindigkeit (z. B. 9 km/h) bzw. einem vorgegebenen Laufvolumen (mindestens 50% der Laufeinheiten) konnten abgeleistet werden bzw. die Betroffenen waren in der Lage, 2-mal pro Woche über 20 min zu laufen) definiert [23, 24, 25, 26]. Die hier ermittelten Werte für den LSI liegen für den Quadrizeps unter den oben genannten Empfehlungen. Im Gegensatz dazu fielen die muskulären Voraussetzungen mit Blick auf die Hamstrings höher aus (► **Tab. 2**). Neben dem LSI wurden in 2 Arbeiten auch absolute Werte für den Quadrizeps ermittelt. Nach Iwame et al. und Dauty et al. können 1,45–1,6 Nm pro kg Körpergewicht als positive Prädiktoren gelten [25, 26].

► **Tab.2** Kriterien für den RTR – Charakteristika von erfolgreichen Rückkehrern.

	Iwame 2021	Grondin 2022	Dauty et al. 2022a	Dauty et al. 2022b
postoperativer Zeitpunkt (Wochen)	≥ 12	≥ 16	≥ 16	≥ 16
Kraft Quadrizeps (LSI) isokinetisch 60°/Sek.	n.g.	≥ 65%	≥ 60%	≥ 60%
Kraft Quadrizeps Nm/kg Körpergewicht	1,45	1,6	n.s.**	n.g.*
Kraft Hamstrings (LSI) isokinetisch 60°/Sek.	n.g.*	n.s	n.s.**	n.g.*
Kraft Hamstrings (LSI) isokinetisch 180°/Sek.	n.g.*	≥ 80%	≥ 90%	n.g.*
Sensitivität/Spezifität LR+/- (Quadrizeps-LSI)	88,6%/87,2% 6,92/0,13***	78,9%/76,8% 3,4/0,27***	77,5%/77% 3,39/0,29	83%/70% 2,8/0,23

*n.g. = nicht genannt (Tests wurden in der jeweiligen Untersuchung nicht durchgeführt.); **n.s.=in der Multiregressionsanalyse nicht in das Modell integriert; *** = eigene Berechnung der LR.

Im Gegensatz dazu integrierten Pairo-t-de-Fontenay et al. neben der Testung der isometrischen Maximalkraft die Kraftausdauer, den SEBT sowie die Ergebnisse in PROMs (ACL-RSI, IKDC-Score – subjektive Subskala), um die prädiktive Validität der Assessments bezüglich einer erfolgreichen (symptomarmen) Einführung eines Return-to-Running-Programms zu überprüfen [22]. Lediglich ein höherer IKDC-Score von 63,7 hatte eine Sensitivität von 77,8% und eine Spezifität von 75% sowie eine 3,11-fach höhere Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Rückkehr ohne negative Reaktion auf den Beginn des Laufprogramms. Die Ergebnisse in den Balance- und Krafttests hatten dagegen keine Aussagekraft. Allerdings wiesen alle Teilnehmer dieser Arbeit einen erstaunlich hohen LSI für den Quadrizeps (82,3–85,3%) und den modifizierten SEBT (97,7–98%) auf [22].

Klinische (Schmerz, Schwellung) und funktionelle Kriterien wie das ROM, die Überprüfung der Bewegungsqualität durch die Single Leg Squats und Sprungtests sowie die Bedeutung von PROMs und Laxitätsmessungen wurden aus Sicht der Autoren für den RTR-Prozess bislang nicht ausreichend validiert. Deren Wertigkeit ist daher momentan unklar. Zu beachten ist aber, dass in diesen Arbeiten teilweise Patienten mit signifikanten Knieschmerzen, Schwellung, Extensionseinschränkungen und einem Hinkmechanismus im Gang von einer Laufbelastung abgeraten wurde [26]. Die klinischen Kriterien in ► **Tab. 1** zu ignorieren, wäre daher kurz-sichtig. Die gleiche Empfehlung galt für Betroffene mit massiven Quadrizeps-Kraftdefiziten (LSI <60%) [23, 24]. Kritisch ist, dass der Schwerpunkt ausschließlich auf das maximale Drehmoment gelegt wurde. Andere Testverfahren und deren Einfluss auf das Ergebnis wurden nicht evaluiert.

Diskussion

Es muss zunächst konstatiert werden, dass ein beträchtlicher Teil der in ► **Tab. 1** genannten Kriterien bis dato nicht validiert wurde.

Ihr wirklicher Wert bleibt daher momentan offen. Für eine kritische Würdigung sollten daher auch Daten aus der klinischen und biomechanischen Grundlagenforschung und der Trainingswissenschaft herangezogen werden.

Für den Quadrizeps-Strength-to-Body-Weight-Quotienten (QS/BW) nach Iwame et al. (Cut-off 1,45Nm/kg) wird eine Sensitivität von 88,6% und eine Spezifität von 87,2% berichtet [25]. Daraus ergeben sich eine positive Likelihood Ratio (LR+) von etwa 6,9 sowie eine negative Likelihood Ratio (LR-) von etwa 0,13. Klinisch bedeutet dies: Ein QS/BW oberhalb des Cut-offs erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Patienten die definierte Laufbelastung tolerieren, moderat; erreichen Patienten diesen Wert dagegen nicht, sinkt diese Wahrscheinlichkeit ebenfalls moderat [27, 28]. Damit besitzt QS/BW eine vergleichsweise hohe praktische Relevanz als Entscheidungshilfe im frühen RTR-Prozess.

Demgegenüber fällt die Trennschärfe der LSI-basierten Quadrizepsparameter geringer aus. Für den Quadrizeps-LSI mit einem Cut-off von 60% bzw. 65% berichten Dauty et al. bzw. Grondin et al. Likelihood Ratios im Bereich einer kleinen Veränderung der Wahrscheinlichkeit (positive Likelihood Ratios im Bereich von ca. 2,8–3,4 sowie negative Likelihood Ratios von ca. 0,23–0,27) [24, 26]. Diese Größenordnungen sprechen eher dafür, dass der LSI des Quadrizeps das klinische Urteil unterstützt, es aber nicht dominiert: Ein positives Ergebnis erhöht die Erfolgswahrscheinlichkeit nur gering, ein negatives Ergebnis reduziert sie schwach. Entsprechend erscheinen LSI-Werte in diesem Bereich weniger als „Freigabekriterium“, sondern eher als Teil eines multimodalen Entscheidungsprozesses. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass einzelne Parameter, etwa Hamstrings-LSI bei höheren Winkelgeschwindigkeiten, in den vorliegenden Arbeiten eine deutlich geringere Aussagekraft aufweisen und damit nur einen geringen zusätzlichen Informationswert liefern.

Nach Zhang et al. benötigt man für eine Laufgeschwindigkeit von ca. 10 km/h mindestens 90° Flexion. Dieser Wert kann bei

18 km/h auf 129° Knieflexion innerhalb der Schwungphase ansteigen. Eine volle Extensionsfähigkeit wird auf der Grundlage ihrer Arbeit für das Joggen nicht zwingend benötigt. Die maximalen Werte schwanken zwischen 10 und 20° Knieflexion und werden vor dem initialen Kontakt und am Ende der Standbeinphase erreicht. Während für eine Laufbelastung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten also annähernd 130° Knieflexion benötigt werden, scheint eine geringe Extensionseinschränkung von <10° kinematisch zumindest möglich zu sein [29].

Im Gegensatz zu diesen biomechanischen Daten wird in manchen Arbeiten eine „volle Extension“ empfohlen [15, 17, 18, 19]. Während Rambaud et al. eine Spezifizierung auf 0° Extension vornehmen, findet sich diese bei Tortoli et al., Sayer et al. und Vascellari et al. nicht. Diese Tatsache ist deswegen von Bedeutung, da gesunde Jugendliche (14,5 Jahre alt) eine physiologische Hyperextension von 5–6° aufweisen [30]. Selbst Erwachsene in einer Altersspanne von 20–44 Jahren zeigen üblicherweise eine Überstreckbarkeit von 1,6° (Frauen: 1,1°–2,1°) bzw. 1° (Männer: 0,6°–1,4°) [31]. Eine Streckfähigkeit von 0° entspräche daher bei einem jugendlichen Patienten mit physiologischer Überstreckbarkeit einem postoperativen Defizit von ca. 5–6°. Dieses Defizit übersteigt auch den Cut-off von 3° als Prädiktor für ein längerfristig schlechtes radiologisches Ergebnis nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes [32].

Weiter gilt zu beachten, dass Patienten nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes in 31,5% (12 Monate postoperativ) bzw. 23,1% (24 Monate postoperativ) der Fälle eine persistierende Extensionseinschränkung (>3°) im Seitenvergleich aufweisen [33]. Sollte vor der Aufnahme von Laufbelastungen tatsächlich die Wiederherstellung einer vollen Extensionsfähigkeit notwendig sein, käme das für diese Patientengruppe einem dauerhaften Laufverbot gleich. In der Zukunft sollte daher das Kriterium „volle Extension“ über eine genaue Gradangabe oder einen Wert im Seitenvergleich spezifiziert werden. Aus Sicht der Autoren sollte für die Rückkehr zum Laufen ein gerades Kniegelenk bestehen (0° Extension). Bei einer signifikanten Überstreckbarkeit sollte die Orientierung langfristig im Seitenvergleich erfolgen und der Unterschied $\leq 3^\circ$ betragen.

Die Rolle des modifizierten SEBT/Y-Balance-Tests ist aufgrund der fehlenden Validierung unklar. Lediglich Greenberg et al. empfehlen einen Cut-off-Wert (► **Tab. 1**) [20]. Rambaud et al. geben allerdings zu bedenken, dass die Gleichgewichtsleistung wertvolle Informationen für die Bewegungskontrolle auch im RTR-Prozess bieten kann [15]. Unterstützt wird diese Sichtweise durch positive Zusammenhänge von Gleichgewichts- und Laufleistung bei Gesunden bzw. Patienten nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes [34, 35, 36].

In Relation zu den beschriebenen Kraft- und Gleichgewichtstests steht bei den Single Leg Squats (SLS) nicht die absolute Leistung, sondern die Bewegungsqualität im Vordergrund. Die Bewertung orientiert sich dabei am „Worst Case Scenario“ für eine Ruptur des vorderen Kreuzbandes bzw. an einem bedeutsamen Risikofaktor für die Entwicklung von patellofemorale Schmerzen, sprich dem dynamischen Knievalgus in Kombination mit einer ipsilateralen Lateralflexion der Wirbelsäule [37, 38, 39, 40, 41, 42].

Ob eine SLS mit einem guten Alignment als positiver Prädiktor für eine erfolgreiche Rückkehr zum Laufen gilt, ist bis dato nur unzureichend untersucht. Im Rahmen der Running Readiness Scale

nach Harrison et al. korreliert der Valgus-Winkel im Test mit der Abweichung der Beinachse in der Frontalebene beim Laufen [43]. Kein direkter Zusammenhang besteht im Gegensatz dazu zur Inzidenz laufbedingter Überlastungsverletzungen [44]. Ähnliche Ergebnisse ermitteln Petushek et al. und Räisänen et al. [45, 46, 47]. Auch hier können die Autoren keinen Zusammenhang zwischen der Leistung im Test und der Verletzungsinzidenz an der unteren Extremität feststellen.

Betrachtet man die hohe Inzidenz einer defizitären Bewegungsqualität bei der Testausführung selbst 6 Monate nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes, die persistierenden biomechanischen Veränderungen beim Laufen und die Zusammenhänge einer Valgus-Beinachse zur Verletzungsinzidenz, so kann einer Beurteilung der Bewegungsqualität mittels Testverfahren und einem darauf aufbauenden Training grundsätzlich zugestimmt werden [37, 41, 48, 49, 50, 51]. Ob über die Identifikation von biomechanischen Risikofaktoren hinaus der SLS bedeutsame Informationen liefert bzw. erfolgreiche Rückkehrer zum Laufen identifiziert, muss aber bis dato offenbleiben.

Der Single Leg Hop (SLH) gehört mit 83% zu den dynamischen Testverfahren, die mit am häufigsten empfohlen werden [17]. Rambaud et al. betonen, dass die physischen Anforderungen bei Sprungtests den Belastungen bei einer Laufbelastung sehr nahe kommen [15]. Aus funktioneller und biomechanischer Sicht sind solche Empfehlungen daher plausibel. Darüber hinaus bestehen Korrelationen zwischen der Sprung- und Sprintleistung, sprich eine bessere Sprungweite ist mit einer schnelleren Sprintzeit assoziiert [36, 52, 53]. Auf der anderen Seite lassen sich in der gegenwärtigen Literatur keine validen Cut-off-Werte für die absolute Sprungweite oder den LSI des SLH bezüglich eines erfolgreichen Return-to-Running-Prozesses finden. Die oben genannten Empfehlungen ($\geq 70\%/85\%/90\%$) entsprechen offensichtlich Expertenmeinungen, deren Validierung noch aussteht. Betrachtet man insbesondere die höheren Cut-off-Werte von $\geq 85\%$ LSI, so zeigen Rambaud et al. in einer hochaktiven Gruppe von rekonstruierten Kreuzbandpatienten mit einem präoperativen Tegner-Score von 8,5 selbst nach 4 Monaten in höchstens 50% der Fälle eine solche Leistungsfähigkeit [54]. Nach einem Jahr Follow-up liegt der Mittelwert in einer aktuellen Metaanalyse nur knapp darüber (86,8% [95%-KI 82,4–91,4%]) [55]. Es stellt sich daher grundsätzlich die Frage, wie realistisch solche Vorgaben sind, vor allem vor dem Hintergrund der fehlenden Validierung. Gleiches gilt im Übrigen auch für die LSI-Werte für die Maximalkraft des Quadrizeps. Zieht man in Betracht, dass ein LSI $\geq 90\%$ selbst nach einem Follow-up von 2 Jahren nur von einem Drittel der Betroffenen erreicht wird, sind solch hohe Hürden unrealistisch [56].

Auch patientenberichtete Outcomes können zur Entscheidung beitragen, sollten jedoch nicht isoliert interpretiert werden. Für den IKDC-Cut-off von 63,7 Punkten nach Pairoot-de-Fontenay et al. resultieren Likelihood Ratios, die ebenfalls im geringen Bereich liegen (LR+ ca. 3,1; LR- ca. 0,30). Dies unterstreicht, dass subjektive Verbesserungen zwar mit einem kurzfristig erfolgreichen RTR-Start assoziiert sein können, aber funktionelle Mindestvoraussetzungen nicht ersetzen [22].

Der Einsatz des ACL-RSI-Fragebogens wird zwar in 2 Arbeiten explizit empfohlen, in den Validierungsstudien findet er aber keine Anwendung [17, 18]. Dies ist umso erstaunlicher, wenn man

bedenkt, dass ein höherer Score mit einer größeren Wahrscheinlichkeit für die Rückkehr in sportliche Aktivitäten assoziiert ist [57]. Darüber hinaus stellen durch das initiale Trauma verursachte Ängste und depressive Verstimmungen eine der Hauptbarrieren für eine reduzierte Aktivität in der postoperativen Phase dar [58]. Der ACL-RSI könnte auf der Basis dieser Daten nicht nur ein wertvolles Instrument sein, um die psychoemotionale Bereitschaft für die Rückkehr in Laufbelastungen zu messen. Vielmehr könnten Betroffene mit ausgeprägten Bewegungsängsten früher identifiziert werden, um sie einer psychologisch informierten Physio- und Sporttherapie zuzuführen [59].

In der Gesamtschau legen die verfügbaren Daten nahe, dass insbesondere absolute Quadrizeps-Kraftparameter (QS/BW) klinisch verwertbare Informationen liefern, während viele der in der Praxis häufig genutzten Testverfahren und deren Cut-offs (insbesondere LSI-basierte Zielwerte) eher ergänzenden Charakter haben. Mit Blick auf die klinische Entscheidungsfindung spricht dies für einen Ansatz, bei dem Testwerte nicht als starre „Go/No-Go“-Schwelle, sondern als gewichtete Bausteine zusammen mit klinischen Kriterien (Schmerz, Schwellung, ROM) interpretiert werden sollten.

Zukünftige Perspektiven

Die Integration von funktionellen Kriterien und die Abkehr von einem rein zeitlich gesteuerten Nachbehandlungsschema stellen eine wichtige Weiterentwicklung der muskuloskeletalen Rehabilitation dar und erfahren in der Literatur eine breite Unterstützung [60, 61]. Dieses Streben hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass für einzelne Aktivitäten, wie z. B. auch das Laufen, Testbatterien entworfen wurden (siehe oben). Die Argumentation ist zunächst schlüssig. Wenn eine gute Qualität/Leistung in einem Test besteht, kann eine Zielaktivität mit höherer Anforderung besser ausgeführt werden. Die existente Literatur (und auch die Praxis) zeigt uns aber, dass funktionelle Tests, die in einem gesicherten und antizipierbaren Umfeld ausgeführt werden, eben nicht die komplexe Realität der späteren Anforderung abbilden können. Es ist daher keineswegs gewiss, dass, wenn die Beinachse bei den Single Leg Squats gerade ist, auch ein achsgerechtes Verhalten beim Laufen besteht [62, 63]. Paradoerweise können auch gegensätzliche Verhältnisse bestehen. Die Betroffenen zeigen eine defizitäre Leistung beim eigentlich banaleren Funktionstest und präsentieren eine adäquate Leistung bei der Zielaktivität. Der Gedankengang „Wenn er oder sie DAS kann, wird später DAS passieren“ ist aus sportmotorischer Sicht zunächst logisch und plausibel. Bei genauerer Betrachtung sind aber die Zusammenhänge zwischen beiden Situationen oft gering. Für diese Tatsache bestehen gerade in der Nachbehandlung nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes genug Beispiele. Stellvertretend seien hier die inkonsistenten Ergebnisse für die Prädiktion des Rezidivrisikos durch funktionelle Testbatterien genannt [64, 65, 66]. Das Erreichen von funktionellen Meilensteinen und eine damit verbundene Sicherheit sind daher für die meisten Funktionstests nicht nachgewiesen.

Aus Sicht der Autoren sollten die Empfehlungen aus ► **Tab. 1** kritisch diskutiert werden:

- **Zeit:** Die in ► **Tab. 1** genannten zeitlichen Empfehlungen gelten für operative Eingriffe mit einer höheren Primärstabilität. Bei knorpelregenerativen Verfahren (z. B. Matrix-assoziierte Zelltransplantation) besteht eine ungleich geringere Belastbarkeit. Die zeitlichen Parameter verschieben sich dementsprechend auf 6 oder mehr Monate [67].
- **Intensität:** In keiner Arbeit wird die Laufgeschwindigkeit diskutiert. Es sollte logisch sein, dass für eine Laufgeschwindigkeit von 8 km/h andere Fähigkeiten notwendig sind als für eine schnellere Geschwindigkeit von 14 km/h [68]. Ein für alle Laufgeschwindigkeiten geltender Cut-off ist daher unrealistisch.
- **Kraftfähigkeiten:** Es ist fraglich, ob ein Fokus auf die Maximalkraft die höchste Relevanz besitzt. Die Zeit bis zur Entwicklung des maximalen Drehmoments bei einem Krafttest beträgt ca. 500 ms, die Anforderungen beim Laufen erfordern dagegen schon innerhalb 150–300 ms eine suffiziente Kraftgeneration. Nach Knurr et al. zeigt dementsprechend auch die bilaterale Symmetrie der Geschwindigkeit der Drehmomententwicklung des Quadrizeps (Rate of Torque Development, RTD) einen stärkeren Zusammenhang zur symmetrischen Kniegelenkbiomechanik beim Laufen als die bilaterale Symmetrie des maximalen Quadrizepsdrehmoments [69]. Die RTD kann aus isokinetischen Messungen (Anstieg der Kraftkurve) und mittels handgehaltenen Dynamometern (z. B. Lafayette-Instrument) ermittelt werden.
- **Zielmuskulatur:** Die Empfehlungen bezüglich der Kraftfähigkeiten beschränken sich häufig auf den M. quadrizeps und die Hamstrings. Lediglich Tortoli et al. thematisieren die seitliche Hüftmuskulatur und den M. triceps surae [17]. Aus funktioneller und klinischer Sicht gibt es starke Hinweise, dass diese Muskelgruppen eine hohe Relevanz aufweisen. Nach Forelli et al. ist eine geringere Aktivierung des Triceps surae mit einer veränderten Kinematik beim Laufen assoziiert [70]. Moreira et al. weisen für eine größere Kraft der Hüftaußenrotatoren eine protektive Funktion gegen Überlastungsverletzungen beim Laufen nach [71]. Es ist daher nur verständlich, dass praktische Handlungsanweisungen innerhalb der Nachbehandlung nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes Empfehlungen auch für spezifische Leistungen in Muskelfunktionstests dieser Muskelgruppen als Kriterium definieren (z. B. 1-beiniges Wadenheben > 20 Wiederholungen oder > 30 Sekunden im Seitstützttest, Melbourne ACL Rehabilitation Guide 2.0) [72]. Das Problem nicht validierter Cut-offs bleibt aber auch hier bestehen.
- **Testform:** Laufen ist eine komplexe Bewegungsform, bei der die Gelenke der unteren Extremität und der Rumpf koordiniert miteinander arbeiten. Es könnte sein, dass Krafttests, die eben diese Muskelgruppen in ihrer synergistischen Funktion gleichzeitig testen, eine höhere Relevanz haben. Moffit et al. zeigen diesbezüglich positive Zusammenhänge der Maximalkraftleistung in den Back-Squat- und kinematischen (Knieflexions- und Innenrotationswinkel) bzw. kinetischen (Knie-Innenrotationsmoment) -Parametern beim Laufen [73]. Keine Zusammenhänge konnten dagegen für die isoliert gemessenen Maximalkraftwerte von Knie- und Hüfttextensoren ermittelt werden.

- **Definition des Outcomes „erfolgreich“:** Die heterogene Definition des Outcomes (unterschiedliche Volumina oder Realisierung von spezifischer Laufgeschwindigkeit) erschwert eine Generalisierung der Ergebnisse und Umsetzung der Cut-offs. Auch wenn diese Belastungen in einer relativ frühen Phase der Rehabilitation eingefordert wurden, so scheinen eine 20-minütige Laufbelastung bzw. eine Laufgeschwindigkeit von 9 km/h für Betroffene mit einer geringeren Ambition adäquat. Für einen Leistungssportler dagegen könnten sie unter der Überschrift „erfolgreich“ vergleichsweise zu gering gewählt sein. Im Kontext langfristiger Gelenkgesundheit sollte darüber hinaus bedacht werden, dass ein Quadrizepsdefizit 6 Monate postoperativ mit einer reduzierten Proteoglykandichte in der Knorpelmatrix des medialen Femurkondylus assoziiert ist [74]. Hinreichend bekannt ist der Zusammenhang von Quadrizepsdefizit und Früharthrose [75]. Für eine abschließend positive Bewertung der Kriterien sollte daher in der Zukunft der Knorpelstatus in der Bildgebung mit beurteilt werden.
- **Einfluss des Transplantats:** In den Validierungsstudien wurde die Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes mit unterschiedlichen Transplantattypen realisiert. In 3 Arbeiten wurden ausschließlich Hamstring-Transplantate verwendet [22, 24, 25]. In den restlichen Arbeiten kamen dagegen Patellarsehnentransplantate oder unterschiedliche Gewebe (Patellarsehne und Hamstrings) zum Einsatz [23]. In keinem Fall wurden Quadrizepssehnen für die Rekonstruktion benutzt. Die Entnahmemorbidität war in der Vergangenheit Gegenstand diverser Arbeiten. In vielen Fällen besteht eine inkomplette Regeneration der betroffenen Sehnen [76, 77]. Dies geht mit einem signifikanten und individuell ausgeprägten Kraftdefizit einher [78]. Es ist daher nicht auszuschließen, dass Transplantat-spezifische Cut-off-Werte bestehen könnten. Dazu passend erreichen in der Arbeit von Dauty et al. Patienten, die mit einem Hamstring-Transplantat versorgt wurden, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit den Quadrizeps-LSI-Cut-off von >60% (OR 2,6) [26].
- **Expertenkonsens:** In vielen Fällen entstanden in den letzten Jahren Empfehlungen auf der Basis von Befragungen von medizinischen Fachkräften, mit oder ohne Delphi-Methodik [17, 18, 19, 20, 21]. Dieses Vorgehen ist hilfreich, da die gängige Praxis abgebildet wird und auch häufig eine wissenschaftliche Basis zugrunde liegt. Im Falle der kriterienbasierten Rehabilitation bestehen aber auch Gefahren. Werden Kriterien ohne hochwertige Validierungsstudien empfohlen, dann ergeben solche Befragungen vage theoretische Konstrukte auf sehr geringem Evidenzniveau. Die Empfehlungen für den RTR-Prozess aus ► **Tab. 1** gehören in Teilen dazu. Die Arbeiten von Iwame et al., Grondin et al., Dauty et al. und Pairet-de-Fontenay et al. sind daher von besonderer Bedeutung [22, 23, 24, 25, 26].

Diese Kritikpunkte sollten nicht als Plädoyer gegen funktionelle Testverfahren verstanden werden. Ganz im Gegenteil: Durch Leistungstests lassen sich wertvolle Informationen gewinnen, wie z. B. der Ist-Zustand im Hinblick auf die motorischen Grundfähigkeiten. Diese Ergebnisse können für die Trainingsplanung (Pro- oder Regression) genutzt werden und geben Auskunft über die momentane mechanische und psychische Belastbarkeit. Des Weiteren

sind Testverfahren für die Betroffenen motivierend, steigern die Adhärenz und die therapeutische Allianz und verbessern die interprofessionelle Kommunikation. Dennoch sollte man sich der Limitationen dieser Verfahren bewusst sein. Die prädiktive Validität der meisten empfohlenen Tests im Rahmen des RTR-Prozesses ist unzureichend. Sie liefern daher momentan keine verlässliche Direktive in der Entscheidungsfindung eines sicheren Wiedereinstiegs.

Fazit

Als Minimalkriterien für die Wiederaufnahme von Laufbelastungen lassen sich klinische Parameter (Schmerz 0–2 auf der NRS und Schwellung), ein suffizientes ROM (0° Extension, 130° Flexion) und eine suffiziente Quadrizepskraft (LSI >60% + 1,45–1,6Nm/kg) definieren. Die Kraftwerte für die ischiocrurale Muskulatur sind in der Vergangenheit evtl. unterbewertet worden [23, 24]. Möglicherweise ist ein Wert von >63,7 auf der subjektiven Subskala des IKCD-Scores hilfreich. Belastbare Cut-offs in anderen Testverfahren bestehen aus Sicht der Autoren nicht. Die mechanische Belastbarkeit sollte durch funktionelle Übungsformen, die der Zielaktivität nahekommen, vorbereitet werden. Das RTR-Programm sollte aus einer Mischung bzw. einem Wechsel von Walking und Laufen bestehen, Volumen und Intensität sollten langsam und in Anlehnung an die Klinik individuell gesteigert werden. Zukünftige Validierungsstudien sollten Merkmale von erfolgreichen Laufrückkehrern ermitteln. Nicht validierte Zielwerte aus umfangreichen Testbatterien sind kritisch zu sehen und ebenso wenig hilfreich wie ein Fokus auf eine rein zeitbasierte Rehabilitation.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Sommer Michael. AWA 2023 – Ein Land im Sportmodus – Sport als aktives und passive Erlebnis. Institut für Demoskopie Allensbach
- [2] Lee D-C, Brellenthin AG, Thompson PD et al. Running as a Key Lifestyle Medicine for Longevity. *Prog Cardiovasc Dis* 2017; 60: 45–55. doi:10.1016/j.pcad.2017.03.005
- [3] Pedisic Z, Shrestha N, Kovalchik S et al. Is running associated with a lower risk of all-cause, cardiovascular and cancer mortality, and is the more the better? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2020; 54: 898–905. doi:10.1136/bjsports-2018-100493
- [4] WHO Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour. Geneva: World Health Organization; 2020
- [5] Videbæk S, Bueno AM, Nielsen RO et al. Incidence of Running-Related Injuries Per 1000 h of running in Different Types of Runners: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2015; 45: 1017–1026. doi:10.1007/s40279-015-0333-8
- [6] Joachim MR, Kuik ML, Krabak BJ et al. Risk Factors for Running-Related Injury in High School and Collegiate Cross-country Runners: A Systematic Review. *J Orthop Sports Phys Ther* 2024; 54: 1–13. doi:10.2519/jospt.2023.11550

- [7] Nielsen RØ, Parner ET, Nohr EA et al. Excessive progression in weekly running distance and risk of running-related injuries: an association which varies according to type of injury. *J Orthop Sports Phys Ther* 2014; 44: 739–747. doi:10.2519/jospt.2014.5164
- [8] Bertelsen ML, Hulme A, Petersen J et al. A framework for the etiology of running-related injuries. *Scand J Med Sci Sports* 2017; 27: 1170–1180. doi:10.1111/sms.12883
- [9] Georgoulis JD, Savvidou OD, Patras K et al. Association of Anterior Knee Pain With Extension Deficit After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Orthop J Sports Med* 2024; 12: 23259671241265840. doi:10.1177/23259671241265840
- [10] Xu C, Zhao Y, Ni Z et al. Returning to pre-injury level of sports before 9 months after medial patellofemoral ligament reconstruction increases the incidence of anterior knee pain in young patients. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2025; 33: 837–845. doi:10.1002/ksa.12411
- [11] Marques FdS, Barbosa PHB, Alves PR et al. Anterior Knee Pain After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthop J Sports Med* 2020; 8: 2325967120961082. doi:10.1177/2325967120961082
- [12] Chantrelle M, Menu P, Crenn V et al. Consequences of anterior knee pain after anterior cruciate ligament reconstruction: A 2015–2020 cohort study. *PLoS One* 2023; 18: e0280146. doi:10.1371/journal.pone.0280146
- [13] Prentice HA, Chan PH, Paxton EW et al. Patient and Operative Risk Factors for Osteoarthritis After Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Cohort Study of 41,976 Patients. *Am J Sports Med* 2024; 52: 2482–2492. doi:10.1177/03635465241261357
- [14] Rambaud AJ, Neri T, Edouard P. Reconstruction, rehabilitation and return-to-sport continuum after anterior cruciate ligament injury (ACL3-continuum): Call for optimized programs. *Ann Phys Rehabil Med* 2022; 65: 101470. doi:10.1016/j.rehab.2020.101470
- [15] Rambaud AJM, Ardern CL, Thoreux P et al. Criteria for return to running after anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. *Br J Sports Med* 2018; 52: 1437–1444. doi:10.1136/bjsports-2017-098602
- [16] Morris ZS, Wooding S, Grant J. The answer is 17 years, what is the question: understanding time lags in translational research. *J R Soc Med* 2011; 104: 510–520. doi:10.1258/jrsm.2011.110180
- [17] Tortoli E, Pellicciari L, Giovannico G et al. Return to running criteria after anterior cruciate ligament reconstruction: an online survey of 1404 Italian physiotherapists. *J Sports Med Phys Fitness* 2024; 64: 931–941. doi:10.23736/S0022-4707.24.15811-2
- [18] Sayer TA, van Melick N, Riera J et al. Is it time to develop specific return to running criteria for ACL rehabilitation? An international survey of physiotherapists criteria for return to running following ACL injury. *Phys Ther Sport* 2024; 67: 19–24. doi:10.1016/j.ptsp.2024.02.005
- [19] Vascellari A, Gokeler A, Grassi A et al. Functional progression milestones following anterior cruciate ligament reconstruction are more appropriate than time-based criteria: a survey among the ESSKA. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2020; 28: 3647–3654. doi:10.1007/s00167-020-05960-3
- [20] Greenberg EM, Greenberg ET, Albaugh J et al. Rehabilitation Practice Patterns Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Survey of Physical Therapists. *J Orthop Sports Phys Ther* 2018; 48: 801–811. doi:10.2519/jospt.2018.8264
- [21] Glatke KE, Tummala SV, Goldberg B et al. There Is Substantial Variation in Rehabilitation Protocols Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Survey of 46 American Orthopaedic Surgeons. *Arthroscopy* 2023; 39: 578–589.e20. doi:10.1016/j.arthro.2022.07.024
- [22] Pairet de Fontenay B, van Cant J, Gokeler A et al. Reintroduction of Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With a Hamstrings Graft: Can We Predict Short-Term Success? *J Athl Train* 2022; 57: 540–546. doi:10.4085/1062-6050-0407.21
- [23] Dauty M, Menu P, Daley P et al. Knee Strength Assessment and Clinical Evaluation Could Predict Return to Running after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Patellar Tendon Procedure. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19. doi:10.3390/ijerph192013396
- [24] Grondin J, Crenn V, Gernigon M et al. Relevant Strength Parameters to Allow Return to Running after Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction with Hamstring Tendon Autograft. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19. doi:10.3390/ijerph19148245
- [25] Iwame T, Matsuura T, Okahisa T et al. Quadriceps strength to body weight ratio is a significant indicator for initiating jogging after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee* 2021; 28: 240–246. doi:10.1016/j.knee.2020.12.010
- [26] Dauty M, Edouard P, Menu P et al. Isokinetic quadriceps symmetry helps in the decision to return to running after anterior cruciate ligament reconstruction. *Ann Phys Rehabil Med* 2022; 65: 101543. doi:10.1016/j.rehab.2021.101543
- [27] Jaeschke R, Guyatt GH, Sackett DL. Users' guides to the medical literature. III. How to use an article about a diagnostic test. B. What are the results and will they help me in caring for my patients? The Evidence-Based Medicine Working Group. *JAMA* 1994; 271: 703–707. doi:10.1001/jama.271.9.703
- [28] Baeyens J-P, Serrien B, Goossens M et al. Questioning the “SPIN and SNOUT” rule in clinical testing. *Arch Physiother* 2019; 9: 4. doi:10.1186/s40945-019-0056-5
- [29] Zhang L, Liu G, Han B et al. Knee Joint Biomechanics in Physiological Conditions and How Pathologies Can Affect It: A Systematic Review. *Appl Bionics Biomech* 2020; 2020: 7451683. doi:10.1155/2020/7451683
- [30] Carlo MS de, Sell KE. Normative Data for Range of Motion and Single-Leg Hop in High School Athletes. *Journal of Sport Rehabilitation* 1997; 6: 246–255. doi:10.1123/jsr.6.3.246
- [31] Soucie JM, Wang C, Forsyth A et al. Range of motion measurements: reference values and a database for comparison studies. *Haemophilia* 2011; 17: 500–507. doi:10.1111/j.1365-2516.2010.02399.x
- [32] Shelbourne KD, Benner RW, Gray T. Results of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Patellar Tendon Autografts: Objective Factors Associated With the Development of Osteoarthritis at 20 to 33 Years After Surgery. *Am J Sports Med* 2017; 45: 2730–2738. doi:10.1177/0363546517718827
- [33] Scholes C, Ektas N, Harrison-Brown M et al. Persistent knee extension deficits are common after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2023; 31: 3172–3185. doi:10.1007/s00167-022-07299-3
- [34] Kim J-G, Lee D-W, Bae K-C et al. Correlation of Y Balance with Clinical Scores and Functional Tests after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Young and Middle-Aged Patients. *Clin Orthop Surg* 2023; 15: 50–58. doi:10.4055/cios21131
- [35] Scinicarelli G, Offerhaus C, Feodoroff B et al. The Association between Multidirectional Speed Performance, Dynamic Balance and Chronological Age in Young Soccer Players. *J Funct Morphol Kinesiol* 2022; 7. doi:10.3390/jfkm7020041
- [36] Lockie RG, Callaghan SJ, Berry SP et al. Relationship between unilateral jumping ability and asymmetry on multidirectional speed in team-sport athletes. *J Strength Cond Res* 2014; 28: 3557–3566. doi:10.1519/JSC.0000000000000588
- [37] Tosarelli F, Buckthorpe M, Di Paolo S et al. Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Male Professional Basketball Players: Injury Mechanisms, Situational Patterns, and Biomechanics. *Orthop J Sports Med* 2024; 12: 23259671241234880. doi:10.1177/23259671241234880

- [38] Della Villa F, Tosarelli F, Ferrari R et al. Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Male Rugby Players: Pattern, Injury Mechanism, and Biomechanics in 57 Consecutive Cases. *Orthop J Sports Med* 2021; 9: 23259671211048182. doi:10.1177/23259671211048182
- [39] Della Villa F, Buckthorpe M, Grassi A et al. Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer): injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases. *Br J Sports Med* 2020; 54: 1423–1432. doi:10.1136/bjsports-2019-101247
- [40] Nunes GS, Moraes WSLA de, Souza Sampaio V de et al. Are Changes in Dynamic Knee Movement Control Related to Changes in Pain or Function in People With Knee Disorders? A Systematic Review and Meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther* 2023; 53: 388–401. doi:10.2519/jospt.2023.11628
- [41] El Melhat AM, El Khatib A, Essa SA et al. Exploring the association of selected lower limb biomechanical variables on exacerbating pain, disability, and postural balance in female athletes with patellofemoral pain syndrome. *Phys Ther Sport* 2025; 75: 38–47. doi:10.1016/j.ptsp.2025.06.004
- [42] Holden S, Boreham C, Doherty C et al. Two-dimensional knee valgus displacement as a predictor of patellofemoral pain in adolescent females. *Scand J Med Sci Sports* 2017; 27: 188–194. doi:10.1111/sms.12633
- [43] Harrison K, Williams DSB, Darter BJ et al. The Running Readiness Scale as an Assessment of Kinematics Related to Knee Injury in Novice Female Runners. *J Athl Train* 2023; 58: 120–127. doi:10.4085/1062-6050-404-21
- [44] Luedke LE, Reddeman ES, Rauh MJ. The Running Readiness Scale and Injury in Collegiate Track and Field and Cross Country Athletes. *J Athl Train* 2025; 60: 301–307. doi:10.4085/1062-6050-0309.24
- [45] Petushek E, Nilstad A, Bahr R et al. Drop Jump? Single-Leg Squat? Not if You Aim to Predict Anterior Cruciate Ligament Injury From Real-Time Clinical Assessment: A Prospective Cohort Study Involving 880 Elite Female Athletes. *J Orthop Sports Phys Ther* 2021; 51: 372–378. doi:10.2519/jospt.2021.10170
- [46] Räsänen AM, Arkkila H, Vasankari T et al. Investigation of knee control as a lower extremity injury risk factor: A prospective study in youth football. *Scand J Med Sci Sports* 2018; 28: 2084–2092. doi:10.1111/sms.13197
- [47] Räsänen AM, Pasanen K, Krosshaug T et al. Association between frontal plane knee control and lower extremity injuries: a prospective study on young team sport athletes. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2018; 4: e000311. doi:10.1136/bmjsem-2017-000311
- [48] deMille P, Lewis CL, Nguyen JT et al. Quality of Movement for Athletes 6 Months After ACL Reconstruction. *Orthop J Sports Med* 2025; 13: 23259671251324525. doi:10.1177/23259671251324525
- [49] Moiroux-Sahraoui A, Mazaes J, Gold M et al. Neuromuscular Control Deficits After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Pilot Study Using Single-Leg Functional Tests and Electromyography. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2025; 10: 98. doi:10.3390/jfmk10010098
- [50] Pairot-de-Fontenay B, Willy RW, Elias ARC et al. Running Biomechanics in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Sports Med* 2019; 49: 1411–1424. doi:10.1007/s40279-019-01120-x
- [51] Nunes GS, Oliveira J de, Iacob G-S et al. Effectiveness of Interventions Aimed at Changing Movement Patterns in People With Patellofemoral Pain: A Systematic Review With Network Meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther* 2023; 53: 748–760. doi:10.2519/jospt.2023.11956
- [52] Lin J, Shen J, Zhang J et al. Correlations between horizontal jump and sprint acceleration and maximal speed performance: a systematic review and meta-analysis. *PeerJ* 2023; 11: e14650. doi:10.7717/peerj.14650
- [53] Schuster D, Jones PA. Relationships between unilateral horizontal and vertical drop jumps and 20 m sprint performance. *Phys Ther Sport* 2016; 21: 20–25. doi:10.1016/j.ptsp.2016.02.007
- [54] Rambaud AJM, Rossi J, Neri T et al. Evolution of Functional Recovery using Hop Test Assessment after ACL Reconstruction. *Int J Sports Med* 2020; 41: 696–704. doi:10.1055/a-1122-8995
- [55] Girdwood MA, Crossley KM, Rio EK et al. Hop to It! A Systematic Review and Longitudinal Meta-analysis of Hop Performance After ACL Reconstruction. *Sports Med* 2025; 55: 101–113. doi:10.1007/s40279-024-02121-1
- [56] Kotsifaki R, King E, Bahr R et al. Is 9 months the sweet spot for male athletes to return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction? *Br J Sports Med* 2025; 59: 667–675. doi:10.1136/bjsports-2024-108733
- [57] Xiao M, van Niekerk M, Trivedi NN et al. Patients Who Return to Sport After Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Have Significantly Higher Psychological Readiness: A Systematic Review and Meta-analysis of 3744 Patients. *Am J Sports Med* 2023; 51: 2774–2783. doi:10.1177/03635465221102420
- [58] Petushek E, Harkey MS, Santiago K et al. Biopsychosocial profiles following ACL reconstruction: A latent class analysis of barriers to return-to-activity. *Phys Ther Sport* 2025; 75: 144–150. doi:10.1016/j.ptsp.2025.08.004
- [59] Diemer F, Zebisch J. Warum wir einen psychologisch informierten Ansatz in der Rehabilitation von VKB-Verletzungen brauchen! *Sportphysio* 2023; 11: 219–229. doi:10.1055/a-2160-8737
- [60] Meredith SJ, Rauer T, Chmielewski TL et al. Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Injury: Panther Symposium ACL Injury Return to Sport Consensus Group. *Orthop J Sports Med* 2020; 8: 2325967120930829. doi:10.1177/2325967120930829
- [61] Memmel C, Koch M, Szymiski D et al. Standardized Rehabilitation or Individual Approach?—A Retrospective Analysis of Early Rehabilitation Protocols after Isolated Posterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Pers Med* 2022; 12. doi:10.3390/jpm12081299
- [62] Vasconcelos DP de, Aidar FJ, Lima TB et al. Assessment of Dynamic Knee Valgus between Lateral Step-Down Test and Running in Female Runners with and without Patellofemoral Pain Using Two-Dimensional Video Analysis. *Clin Pract* 2022; 12: 425–435. doi:10.3390/clinpract12030047
- [63] Rees D, Younis A, MacRae S. Is there a correlation in frontal plane knee kinematics between running and performing a single leg squat in runners with patellofemoral pain syndrome and asymptomatic runners? *Clin Biomech (Bristol)* 2019; 61: 227–232. doi:10.1016/j.clinbiomech.2018.12.008
- [64] Gill VS, Tummala SV, Sullivan G et al. Functional Return-to-Sport Testing Demonstrates Inconsistency in Predicting Short-Term Outcomes Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Arthroscopy* 2024; 40: 2135–2151.e2. doi:10.1016/j.arthro.2023.12.032
- [65] West TJ, Bruder AM, Crossley KM et al. Unilateral tests of lower-limb function as prognostic indicators of future knee-related outcomes following anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis of 13 150 adolescents and adults. *Br J Sports Med* 2023; 57: 855–863. doi:10.1136/bjsports-2022-105736
- [66] Simonsson R, Sundberg A, Piussi R et al. Questioning the rules of engagement: a critical analysis of the use of limb symmetry index for safe return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *Br J Sports Med* 2025; 59: 376–384. doi:10.1136/bjsports-2024-108079
- [67] Niethammer TR, Aurich M, Brucker PU et al. Nachbehandlung nach Knorpeltherapie am Kniegelenk – eine Empfehlung der AG Klinische Geweberegeneration der DGO. *Z Orthop Unfall* 2024; 162: 614–622. doi:10.1055/a-2206-7242
- [68] Goodson C, McLeod AR, Kearns Z et al. External loading of common training drills: Ranking drills to design progressive return-to-run programs. *Phys Ther Sport* 2022; 58: 167–172. doi:10.1016/j.ptsp.2022.10.012
- [69] Knurr KA, Cobian DG, Kliethermes SA et al. The Influence of Quadriceps Strength and Rate of Torque Development on the Recovery of Knee Biomechanics During Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med* 2023; 51: 3171–3178. doi:10.1177/03635465231194617

- [70] Forelli F, Moiroux-Sahraoui A, Mazeas J et al. Gastrocnemius activation deficits and running biomechanics after anterior cruciate ligament reconstruction: the missing link? *Front Sports Act Living* 2025; 7: 1594247. doi:10.3389/fspor.2025.1594247
- [71] Moreira PF, Veras PM, Oliveira TMD et al. Incidence and biomechanical risk factors for running-related injuries: A prospective cohort study. *J Clin Orthop Trauma* 2024; 57: 102562. doi:10.1016/j.jcot.2024.102562
- [72] Cooper R, Hughes M. *Melbourne ACL-Information Guide 2018*
- [73] Moffit T, Montgomery MM, Lockie RG et al. Association Between Knee- and Hip-Extensor Strength and Running-Related Injury Biomechanics in Collegiate Distance Runners. *J Athl Train* 2020; 55: 1262–1269. doi:10.4085/1062-6050-0532.19
- [74] Pietrosimone B, Pfeiffer SJ, Harkey MS et al. Quadriceps weakness associates with greater T1ρ relaxation time in the medial femoral articular cartilage 6 months following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2019; 27: 2632–2642. doi:10.1007/s00167-018-5290-y
- [75] Arhos EK, Thoma LM, Grindem H et al. Association of Quadriceps Strength Symmetry and Surgical Status With Clinical Osteoarthritis Five Years After Anterior Cruciate Ligament Rupture. *Arthritis Care Res (Hoboken)* 2022; 74: 386–391. doi:10.1002/acr.24479
- [76] Dhillon MS, Rajnish RK, Dhillon S et al. Is there significant regeneration of the hamstring tendons after harvest for ACL reconstruction? A systematic review of literature. *J Clin Orthop Trauma* 2021; 16: 208–218. doi:10.1016/j.jcot.2021.02.011
- [77] Svensson M, Movin T, Rostgård-Christensen L et al. Ultrastructural collagen fibril alterations in the patellar tendon 6 years after harvesting its central third. *Am J Sports Med* 2007; 35: 301–306. doi:10.1177/0363546506293898
- [78] Girdwood M, Culvenor AG, Rio EK et al. Tale of quadriceps and hamstring muscle strength after ACL reconstruction: a systematic review with longitudinal and multivariate meta-analysis. *Br J Sports Med* 2025; 59: 423–434. doi:10.1136/bjsports-2023-107977