



Nachbehandlung nach knorpelregenerativen Eingriffen

Was müssen Chirurgen und Therapeuten wissen?

Anja Hirschmüller^{1,2} · Wolfgang Schoch³ · Frank Diemer⁴

¹Klinik für Orthopädie und Traumatologie, Universitätsklinikum Freiburg, Freiburg, Deutschland

²Altius Swiss Sportmed Center Rheinfelden, Rheinfelden, Schweiz

³PULZ im Rieselfeld, Freiburg, Deutschland

⁴Digotor GbR, Brackenheim, Deutschland

Zusammenfassung

Die Rehabilitation nach knorpelregenerativen Eingriffen ist maßgeblich für die Qualität des sich entwickelnden Regenerates und das klinische Ergebnis. Allerdings fehlen immer noch qualitativ gute Studien, die dies und die einzelnen sinnvollen Maßnahmen im Rahmen des Rehabilitationsprozesses belegen. Die vorgeschlagenen Rehabilitationsprotokolle basieren in vielen Aspekten auf Expertenmeinungen, angewandter Biomechanik und Grundlagenforschung. Dieser Beitrag fasst die aktuell bestehende Evidenz und Empfehlung der Rehabilitation nach knorpelregenerativen Eingriffen zusammen und kann einen Rahmen geben für die optimale Übungsauswahl und deren Progression, Erwartungshaltung, Motivation der Patientinnen und Patienten und notwendige Anpassungen des Lebensstils und Beachtung möglicher schmerztreibender Faktoren. Besonderer Schwerpunkt des Beitrags liegt auf der zeit- und kriterienbasierten Planung und Steuerung der Nachbehandlung unter Berücksichtigung, der auf die Heilung Einfluss nehmenden individuellen Faktoren.

Schlüsselwörter

Kriterienbasiert · Treibermodell · International Classification of Functioning, Disability and Health · Maturationsphase · Rehabilitationsprotokolle

Die Rückkehr in ihre Alltagsbelastung und ihre Freizeitaktivitäten und die damit verbundene Selbstbestimmung und Zufriedenheit der Patient:innen sind das primäre Ziel der Rehabilitation [70]. Chirurg:innen und Physiotherapeut:innen sind sich einig, dass die Rehabilitation nach Eingriffen am Knorpel maßgeblich ist für die Qualität des sich zu einem belastbaren Knorpel entwickelnden Regenerates und für das Patientenoutcome. Allerdings fehlen immer noch qualitativ gute Studien, die diese Aussagen belegen. Die vorgeschlagenen Rehabilitationsprotokolle basieren in vielen Aspekten auf Expertenmeinungen, angewandter Biomechanik und Grundlagenforschung [15, 16, 25, 38, 40, 54]. Grundsätzlich sollten aber alle Dimensionen der Gesundheit – dazu gehört die physische, psychi-

sche und die soziale Gesundheit – im Rahmen der Rehabilitation mit entsprechenden Messinstrumenten erfasst und in das biopsychosoziale Modell der International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) eingeordnet werden. Der monokausale Ansatz wie „struktureller Schaden macht Schmerz“ hat sich zu einem multikausalen Ansatz weiterentwickelt. Die ICF klassifiziert Körperfunktionen und -strukturen, Aktivitäten und Teilhabe sowie Umweltfaktoren als Komponenten der Gesundheit [71]. Um dem gerecht zu werden, ist die auf den Patienten abgestimmte, individuelle Rehabilitation essenziell. Nachbehandlungs-Guidelines können einen Rahmen schaffen für die Erwartungshaltung und Motivation der Patient:innen, die optimale Progression der Übungen, für notwendi-



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

ge Anpassungen des Lebensstils und die Beachtung schmerztreibender Faktoren. Aktuell bestehende Nachbehandlungsempfehlungen basieren weiterhin häufig auf dem Faktor Zeit. Wann darf wie viel belastet werden, wann darf Ergometertaining stattfinden, wann geht es zurück zum Sport? Aufgrund der biologischen Phasen der Einheilung und Entwicklung der Knorpelzellen erscheint das sinnvoll. Allerdings wird jeder Patient mit unterschiedlichen Voraussetzungen in die Operation gehen, unterschiedlich auf die Operation reagieren und den Rehabilitationsprozess in unterschiedlichem Tempo durchlaufen. So kann z. B. eine exzessive Entzündungsreaktion das Knorpelregenerat und damit das Nachbehandlungsergebnis gefährden. Es ist daher darauf zu achten, die lokalen inflammatorischen Prozesse individuell zu beurteilen [31, 61]. Dass Patienten derart verschieden reagieren, könnte auf individuell unterschiedliche „Treiber“ zurückzuführen sein, welche die Rehabilitation maßgeblich mitbeeinflussen. Die Nachbehandlung nach knorpelregenerativen Eingriffen wird deshalb zeit- und kriterienbasiert geplant und gesteuert. Kriterienbasiert bedeutet, dass für die Progression innerhalb der Nachbehandlung bestimmte klinische (z. B. Reizzustand des Gelenks) oder funktionelle (z. B. sauberes Gangbild) Meilensteine erreicht werden sollten, um zur nächsten Stufe überzugehen. Zeit- und kriterienbasiertes Vorgehen schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich, um eine sichere Rückkehr zur Arbeit oder zum Sport zu ermöglichen.

Übergeordnete Prinzipien in der Nachbehandlung muskuloskeletaler Beschwerden

Treibermodell

Im Rahmen eines ICF-basierten Modells wurden sog. Treibermodelle implementiert, die einerseits die Komplexität des individuellen Beschwerdebilds ausreichend abbilden und andererseits erklären, warum eindimensionale Behandlungsansätze nicht allen Patienten gerecht werden [63]. Auch wenn diese Modelle zunächst im Kontext chronischer Beschwerden entstanden sind, kann das Paradigma auf

alle muskuloskeletalen Erkrankungen und auch auf die postoperative Nachbehandlung übertragen werden.

Im Treibermodell werden 5 Domänen unterschieden. Neben dem nozizeptiven Treiber (strukturelle Schäden und funktionelle Defizite) [15, 60] und dem neuralen Treiber (Sensibilisierungsprozesse) [17] werden Komorbiditäten (muskuloskeletal, internistisch, psychiatrisch) [12], kognitiv-emotionale (Kinesiophobie, Angstvermeidung, ungünstige Glaubensbekenntnisse) und Kontextfaktoren (therapeutisches Team, Familie) [64] bedacht. Übergeordnetes Ziel dieses Modells ist es, den Patienten in der postoperativen Phase nicht als einfachen „Knorpelpatienten“ zu betrachten, sondern beitragende Faktoren zu erkennen und entsprechend in die Behandlung zu integrieren.

Transplantatentwicklung

Die Entwicklung des Geweberegenerats nach einem operativen Eingriff verläuft in verschiedenen Phasen (mod. nach [16]):

- Implantation – Akutphase (bis ca. 2. Woche),
- Protektion – frühe Proliferation (2. bis ca. 6. Woche),
- Übergang – späte Proliferation (6. bis ca. 12. Woche),
- Remodellierung (12. bis ca. 26. Woche),
- Maturation (> 26. Woche).

Die Ausreifung und damit auch Stabilisierung des Gewebes benötigten dabei mehr Zeit als bisher angenommen. Nach Paatela et al. und Niethammer et al. sollten für diesen Prozess 4 bis 5 Jahre veranschlagt werden [42, 45]. Oben beschriebene Phasen ergeben eine grobe zeitliche Orientierung, die nicht zu rigide angesehen werden sollte. Angeleitete Interventionen müssen innerhalb des zeitlichen Rahmens durch klinische und funktionelle Kriterien individuell angepasst werden. Die „Abkehr“ von einer rein zeitlichen Steuerung der Rehabilitation wird als Schlüssel für eine patientenzentrierte Nachbehandlung angesehen [36]. Dennoch müssen biologische Grenzen akzeptiert werden, und es kann eine pragmatische Zuordnung von Zielen und Maßnahmen innerhalb der Phasen erfolgen. Im Optimalfall kann den post-

operativen Phasen eine präoperative Vorbereitung vorgeschaltet werden.

Präoperative Phase

Die postoperative Rehabilitation nach knorpelregenerativen Eingriffen ist langwierig, anspruchsvoll und fordert von Patienten viel Geduld, Ausdauer und Disziplin. Die Patienten kommen vor der Operation zu uns mit unspezifischen Knieschmerzen, wiederkehrendem Kniegelenkerguss [22, 23], veränderter motorischer Kontrolle und signifikanten Quadrizepskraftdefiziten [26, 69]. Nicht nur physisch, sondern auch mental müssen die Patienten vorbereitet werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen [16, 69]. Ängste, Angstvermeidungsverhalten, Katastrophisierung, Depressionen und übersteigerte Erwartungen nehmen Einfluss auf das postoperative Outcome [1, 2, 9–11, 34, 41, 62]. Deshalb sollte die Wartezeit bis zur Operation sinnvoll genutzt werden, um erste Ziele zu erreichen [24]. Neben einem bestmöglichen Funktionstraining sollte hier die Edukation in allen Facetten im Mittelpunkt stehen:

- *biomechanisch*: z. B. Darstellung von biomechanisch belastenden Aktivitäten und Aufzeigen entsprechender Modifikationsmöglichkeiten,
- *motorisch*: z. B. Vorbereitung von essenziellen Bewegungsmustern im Alltag (u. a. Gangschule und Gebrauch von Gehstützen) und Instruktion von rehabilitationsrelevanten Übungen,
- *kognitiv*: z. B. Umgang mit Schmerz beim Training [58], zeitlicher Ablauf der postoperativen Heilungsphasen, Operationstechniken etc.,
- *psychosozial*: z. B. Erklärung von wichtigen Zusammenhängen zwischen persistierenden Schmerzen und Glaubensbekenntnissen, Ängsten oder Kontextfaktoren.

Sollte es der aktuelle Reizzustand des betroffenen Gelenkes zulassen, so werden weiter die Aktivierung und Kräftigung von Schlüsselmuskeln angeleitet, um das postoperative Defizit so gering wie möglich zu halten.

Tab. 1 Mögliche Trainingsparameter für ein antiinflammatorisches Ausdauertraining, Cross-Education und Kraftausdauer mit geringer Last			
	Aerobe Grundlagenausdauer	Cross-Education	Kraftausdauer mit geringer Last
Hilfsmittel	Oberkörperergometer	Kniestrecker	Kniestrecker, Beinpresse
Intensität	Mittel bis hoch: Borg-Skala 13–18	Hoch, $\geq 80\%$ der Maximalkraft	30% der Maximalkraft
Wiederholungen	Dauermethode	6–12	> 30–40
Serien, Serienpause	1, keine	3, 2 min	3, 1–2 min
Frequenz pro Woche	3- bis 5-mal	2- bis 3-mal	3-mal
Dauer	9 bis 12 Wochen	8 Wochen	10 Wochen

Postoperative Akutphase

Innerhalb der ersten 2 Wochen stehen die Kontrolle der entzündlichen Reaktion sowie der Schutz und die Ernährung des Implantats im Vordergrund.

Mittlerweile gibt es eine ausreichende Evidenz dafür, dass eine hohe und lang anhaltende entzündliche Reaktion einen bionegativen Effekt auf das Knorpelregenerat haben kann [31, 48, 61]. Bei Hinweisen auf ein hohes proinflammatorisches Milieu sollten daher physikalische Maßnahmen (Kryotherapie) oder eine medikamentöse Behandlung zum Einsatz kommen. Aus sporttherapeutischer Sicht kann ein aerobes Grundlagenausdauertraining den systemischen Entzündungsstoffwechsel positiv beeinflussen und mittels eines Oberkörperergometers direkt postoperativ begonnen werden ([55, 72]; **Tab. 1**).

Für den Schutz des Implantats ist bei tibiofemorale Defekten in der Regel eine Teilbelastungsvorgabe (15–20 kg) über 6 Wochen vorgesehen. Patient*innen mit patellofemorale Defekten können in Streckstellung einer frühen Vollbelastung zugeführt werden. Das erlaubte Bewegungsausmaß wird insbesondere bei letztgenannten Läsionen schrittweise gesteigert (0–30°, 0–60°, 0–90° über 6 Wochen). Patient*innen mit Defekten außerhalb der Belastungszone oder „contained“ Defekten können bei engmaschiger Kontrolle progressiver geführt werden [43]. Die Ernährung des Knorpelregenerats wird über die Frühmobilisation (passive Bewegungsschiene und/oder aktive Automobilisation) sichergestellt. Die genauen Parameter sind unklar, es wird aber mindestens 1 h pro Tag über 6 Wochen empfohlen [16, 25, 29].

Ein wirkliches aktives Widerstandstraining am betroffenen Kniegelenk ist in dieser Phase unrealistisch, dennoch können über mentale Methoden (z. B. Bewegungsvorstellung – „mental motor imagery“ – oder die visuelle Darstellung von Bewegungen – „action observation“) Adaptionen erreicht werden, die einem effektiv ausgeführten Training ähnlich sind [47, 56, 57, 73]. Ähnliches ist für die sog. Cross-Education nachgewiesen, bei der ein intensives Krafttraining auf der gesunden Seite eine Adaption auf der betroffenen Seite zur Folge hat ([13]; **Tab. 1**).

Kriterien und Ziele sind in dieser Phase insbesondere auf den Reizzustand des betroffenen Gelenks bezogen:

- $< 2^\circ$ Temperaturdifferenz im Seitenvergleich (**Abb. 1**),
- kein Ruheschmerz, Schmerz $< 3/10$ auf einer numerischen Skala bei der Mobilisation,
- < 1 cm Schwellungszunahme nach Mobilisation/Belastung.

Protektion – frühe Proliferation

Neben den Zielen der Akutphase steht in der zweiten Phase die Aktivierung des Quadrizeps und wichtiger Stabilisatoren angrenzender Gelenke im Vordergrund.

Patient*innen mit Knorpelschäden haben prä- und postoperativ ausgeprägte Quadrizepsdefizite [15, 26]. Selbst nach Jahren (Follow-up 5 bis 7 Jahre) persistieren diese, und es gibt klare Assoziationen zu einer frühen Degeneration [3, 49]. Die Inhibition des Quadrizeps sollte nicht als eine einfache reflektorische Hemmung verstanden werden. Sie ist vielmehr als ein zentrales Aktivierungsdefizit mit neuroplastischen Veränderungen zu

verstehen und dementsprechend auch zu behandeln [44, 50]. Am besten kann die Aktivierung des Quadrizeps durch ein isoliertes Training im Kniestrecker, mit einem Fokus auf der exzentrischen Kontraktionsphase in Kombination mit mentalen Methoden (s. oben), Vibration, Kryotherapie und Elektrostimulation erreicht werden ([6, 44, 50]; **Abb. 2**). Ist die genaue Defektlokalisierung bekannt, kann das ROM („range of motion“) in nicht belastete femorotibiale Kontaktzonen verlagert werden.

Im Kontext Quadrizepstraining werden auch immer wieder die mechanischen Auswirkungen von Übungen im geschlossenen und offenen System diskutiert [68]. Es ist in diesem Zusammenhang wichtig zu verstehen, dass die Generierung von Scher- und Kompressionskräften nicht von einem bestimmten System abhängig ist, sondern maßgeblich von der Ausrichtung der Wirkungslinien der Kniestabilisatoren und damit vom angeleiteten Bewegungsausmaß bestimmt wird (**Abb. 3**; [59]). Übungen im offenen und geschlossenen System sollten daher wertfrei in Kombination zum Einsatz kommen.

Ein Training für die angrenzenden Gelenke (Hüft- und Sprunggelenkmuskulatur) runden das Programm in dieser Phase ab. Die Funktion in angrenzenden Muskelgruppen (z. B. Hüftrotatoren) ist dabei sowohl für die Beinachsenstabilität, die Funktion in „patient reported outcome measures“ und auch für den Status des hyalinen Gelenkknorpels von Bedeutung [19].

Neben den Kriterien und Zielen der Akutphase sollten folgende Meilensteine erreicht werden:

- schmerzabhängige Vollbelastung,
- volles Bewegungsausmaß (tibiofemorale und patellofemorale),
- gute Quadrizepsinnervation (aktives gestrecktes Beinabheben möglich ohne Extensionsverlust),
- Gangbild mit und ohne Stützen ohne Hinkmechanismus.

Übergang – späte Proliferation

In der späten Proliferation stehen die Reconditionierung des Quadrizeps und ein globales Muskeltraining der unteren Extremität im Vordergrund.

Bedingt durch die hohe Gelenkbelastung beim Krafttraining empfehlen sich



Abb. 1 ▲ Temperaturmessung zur Beurteilung des Reizzustandes des betroffenen Kniegelenks. Hyperthermien $> 2^\circ$ im Seitenvergleich gelten als akut [14]

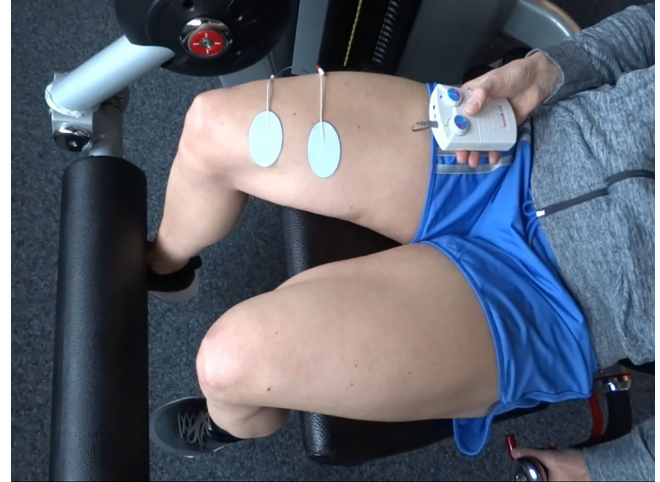


Abb. 2 ▲ Isolierte Quadrizepsaktivierung im Kniestrecker in Kombination mit Elektrostimulation

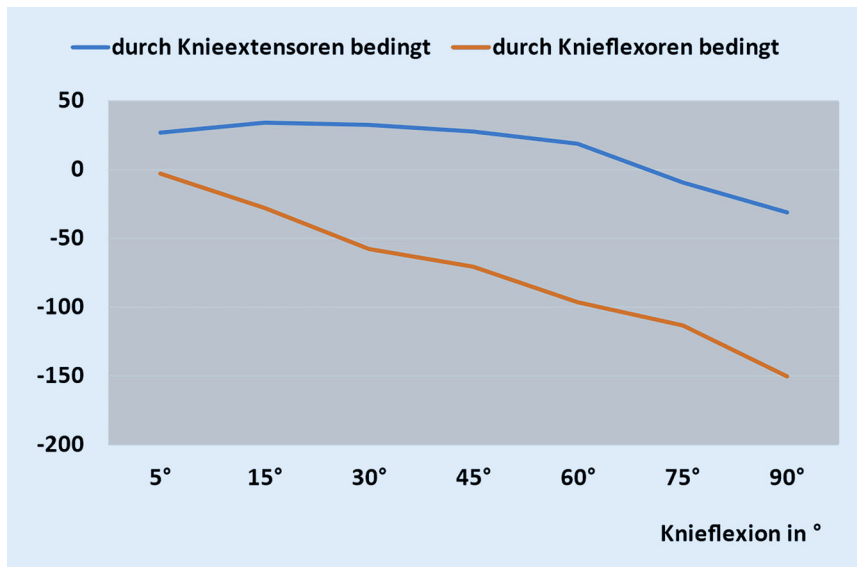


Abb. 3 ▲ Generierung von Scherkräften durch den Quadrizeps. Keine oder nur minimale Scherkräfte entstehen bei einem Gelenkwinkel $\pm 60^\circ$ [59]

zunächst Methoden mit einer geringen externen Last, aber einem hohen Volumen mit metabolischer Ermüdung. Methoden der Wahl wären Kraftausdauer mit geringer Last (■ Tab. 1) oder das Training mit einer Blutflussrestriktion („blood flow restriction“ [BFR]). In beiden Fällen gibt es starke Evidenz, dass insbesondere für die Steigerung der Muskelmasse gleiche Effekte wie bei einem hochintensiven Krafttraining entstehen können [32, 37]. Bedingt durch die gute Schmerztoleranz [5] ist gerade das BFR-Training auch in der postoperativen Therapie [67] und explizit nach knorpelregenerativen Eingriffen

angekommen [27, 35]. Bei ausreichender Belastbarkeit kann dann schrittweise der Übergang in ein herkömmliches Krafttraining mit höheren Lasten erfolgen.

Patient*innen nach Knie Traumata (z. B. vordere Kreuzbandruptur) weisen häufig persistierende neuromuskuläre Defizite auf. Diese können sich auf kinematischer Ebene manifestieren (z. B. geringerer Kniebeugewinkel im Gang), aber auch auf kinetischer (z. B. geringere Bodenreaktionskräfte beim Springen) oder neuromuskulärer Ebene (z. B. stärkere Aktivierung der ischiokruralen Muskulatur in der Elektromyographie) [18, 46]. Diese

automatisierten Kompensationen sollten nach den Prinzipien des motorischen Lernens adressiert werden. Unter anderem gelten in diesem Kontext folgende Empfehlungen [20]:

- Ausbildung variabler Bewegungsstrategien im Sinne des differenziellen Lernens,
- explizites Feedback bei der Bewegungsausführung (externes Feedback überbewerten),
- Beachtung der Patientenpräferenz bei der Übungsauswahl (selbstkontrolliertes Lernen),
- Progression der Anforderung angepasst an die Phasen des motorischen Lernprozesses.

Neben den Kriterien und Zielen der ersten beiden Phasen sollten folgende Meilensteine erreicht werden:

- hinkfreies Gangbild ohne Gehhilfen,
- gute Toleranz bei Belastungssteigerung im Krafttrainingsbereich.

Remodellierung

In der Phase der Remodellierung stehen die Kraftentwicklung der knieumgebenden Muskulatur und die damit verbundene Vorbereitung auf die Rückkehr zur vollen Arbeitsfähigkeit und Rückkehr in die sportliche Aktivität im Vordergrund.

Krafttrainingsmethoden werden innerhalb der Rehabilitation üblicherweise periodisiert angeleitet. Unter Periodisierung

Tab. 2 Möglicher Aufbau eines Kraftaufbautrainings mit linearer Periodisierung					
Methode/ Parameter	Kraftausdauer	Hypertrophie	Intramuskuläre Koordination	Schnellkraft	Reaktivkraft
Wiederholungen	15–20	8–12 30–40 bis zur Ermüdung	1–3	1–6	10–12
Serien	3–4	3–5	3–6	1–5	3–5
Pause	< 1 min	< 1/2–3 min	5 min	1–3 min	10 min
Rhythmus	2-0-2	3-0-1/1-0-1	Fließend Explosiv	Zügig-explosiv	Explosiv Alle 6–8 s
Periodisierung	4 Wochen	10 bis 12 Wochen	6 bis 8 Wochen	4 Wochen	

Tab. 3 Rückkehr in den Sport, Rückkehr auf das Preinjury-Level		
Verfahren	Rückkehr in den Sport (%)	Rückkehr auf das Preinjury-Level (%)
Mikrofraktur	44–83	25–75
Osteochondraler autologer Transfer	87–100	67–93
Osteochondrale allogene Transplantation	77–80	64
Autologe Chondrozytentransplantation	33–96	26–67

versteht man die geplante Veränderung von Trainingsvariablen wie Gewicht, Sätze und Wiederholungen, um eine maximale Trainingsanpassung mit minimaler Erschöpfung zu erreichen [8]. In der Rehabilitation von muskuloskeletalen Beschwerden kommt am häufigsten die lineare Periodisierung zum Einsatz (von hohem Volumen zu hoher Intensität) [28]. Diese schrittweise Progression von einer Trainingsphase zur nächsten entspricht den Phasen der Heilung und ist so eine sichere postoperative Trainingsform [33, 53].

Um die Kraftentwicklung und damit die Gelenkbelastung langsam zu steigern, startet die lineare Periodisierung mit dem Training der Kraftausdauer, gefolgt von der Maximalkraft, dann Schnellkraft bis hin zur Reaktivkraft. Wie das in der Praxis umgesetzt werden kann, zeigt **Tab. 2**.

Die Kräftigung des Quadrizeps erfolgt im offenen und im geschlossenen System wie z. B. am Kniestrecker, an der Beinpresse oder mit Kniebeugen. Das Monitoring der Progression erfolgt über funktionelle Testverfahren, die Bewegungsqualität und Bewegungsquantität beurteilen. Zusätzlich sollten Fragebögen genutzt werden, die psychosoziale Faktoren wie Angstvermeidung und Depression abfragen, da diese den Therapieverlauf ungünstig beeinflussen können [52, 66].

Mögliche Tests und Fragebögen sind:

- Tests qualitativ: Landung, Richtungswechsel,

- Tests quantitativ: „single leg hop“, „side hop“, „square hop“,
- Fragebögen: Tampa Scale of Kinesiophobia, KOOS (Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score), PROMIS-29.

Neben den Kriterien und Zielen der vorherigen Phasen sind folgende Meilensteine zu erreichen:

- Limb symmetry Index (LSI): Quadrizeps und Hamstrings 80/90% (Kraftunterschied im Seitenvergleich),
- Balance Q/H: 100:65% (Verhältnis Quadrizepskraft zu Hamstringskraft),
- isokinetisches Drehmoment des Quadrizeps: 3 Nm/kg Körpergewicht [30].

Maturation

Diese Phase steht im Zeichen der Ausbildung sportartspezifischer Kraftqualitäten und komplexer motorischer Fertigkeiten, um die uneingeschränkte Partizipation im Sport zu erreichen.

Im koordinativen Training wird in den letzten Jahren intensiv über neurokognitive Defizite geforscht, die schon vor einer Verletzung Bestand hatten. Diese äußern sich durch eine persistierende, langsamere Reaktions- oder Verarbeitungsgeschwindigkeit und reduzierte Gedächtnisleistung bei komplexen Aufgaben [4]. Das Trauma und deren Folgen (z. B. Deafferentation durch Verlust des vorderen Kreuzbandes oder Afferenzen bedingt durch rezidivie-

rende Schwellung) verstärken und manifestieren diese Defizite und stellen einen relevanten Risikofaktor für eine neuerliche Verletzung dar [21, 51]. Aus diesem Grund sollten noch mehr mentale, visuelle, auditive, verbale und kinästhetische Aufgaben („dual task“) in das koordinative Training integriert werden. Diese lenken die kognitive Aufmerksamkeit des Trainierenden von der Ausführung einer motorischen Aufgabe ab und replizieren die spätere komplexe Anforderung im Sport [65]. Die Arbeitsgruppe um Grooms et al. schlägt daher auch die Erweiterung klassischer Funktionstests (z. B. „single leg hop“) durch neurokognitive Aufgaben vor [21].

Bezüglich der Periodisierung der Krafttrainingsmethoden stehen in dieser Phase Schnell- und Reaktivkraftmethoden im Vordergrund. Gerade die Geschwindigkeit der Kraftentwicklung („rate of force development“) bleibt trotz guter Adhärenz der Trainierenden nach Monaten noch reduziert. Buckthorpe et al. empfehlen daher die Fokussierung auf explosive Kontraktionen mit submaximalen Lasten und Übungsvarianten im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus, um die Defizite zu beheben [6, 7].

Um die aktuelle Leistungsfähigkeit zu überprüfen, werden in dieser Phase speziell für die jeweilige Sportart entwickelte On-field-Testungen durchgeführt, wie z. B. der Agility (Cone)-T-Test [39].

Die zu erreichenden Meilensteine orientieren sich an der sportartspezifischen Norm.

Die Rückkehr in den kniebelastenden Sport nach knorpelregenerativen Verfahren ist mittlerweile gut untersucht [74, 75]. In Abhängigkeit von der angewandten Methode werden grundsätzlich gute, aber variable Werte erreicht. Analog zu anderen Operationsmethoden wird das Pre-

injury-Level in vielen Fällen nicht erreicht (▣ Tab. 3; [75]).

Fazit für die Praxis

- Die an der Rehabilitation beteiligten Disziplinen brauchen ein Basiswissen über Heilungsphasen, Kriterien der Gelenkbelastung und die Theorie der Periodisierung des Trainings und des motorischen Lernens, um gemeinsam einen für die Patient*innen sinnvollen Plan zu entwickeln und sie so zu ihrem angestrebten Ziel zu bringen.
- Über die postoperative Nachbehandlung nach knorpelregenerativen Verfahren ist der Wissensstand weiterhin begrenzt.
- Es empfiehlt sich daher, sich an Prinzipien der Nachbehandlung anderer operativer Eingriffe zu orientieren, stets unter Berücksichtigung der biologischen Maturationsphasen des Knorpelregenerats und des Zustandes der Patient*innen.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Anja Hirschmüller
Klinik für Orthopädie und Traumatologie,
Universitätsklinikum Freiburg
Freiburg, Deutschland
anja.hirschmueller@altius.ag



Wolfgang Schoch
PULZ im Rieselfeld
Rieselfeldallee 12, 79111 Freiburg, Deutschland
Wolfgang.schoch@pulz-freiburg.de

Funding. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. W. Schoch, F. Diemer und A. Hirschmüller geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts,

über die Patient/-innen zu identifizieren sind, liegt von ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern/Vertreterinnen eine schriftliche Einwilligung vor.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Ackermann J, Ogura T, Duerr RA, Barbieri Mestriner A, Gomoll AH (2018) Preoperative mental health has a stronger association with baseline self-assessed knee scores than defect morphology in patients undergoing cartilage repair. In: *Cartilage* <https://doi.org/10.1177/1947603518783484>
2. Alattas, Adla S, Smith T, Bhatti M, Wilson-Nunn D, Donell S (2017) Greater pre-operative anxiety, pain and poorer function predict a worse outcome of a total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25(11):S. 3403–S. 3410. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4314-8>
3. Arhos EK, Thoma LM, Grindem H et al (2022) The association of quadriceps strength symmetry and surgical status with clinical osteoarthritis 5 years after anterior cruciate ligament rupture. *Arthritis Care Res* 74:386
4. Bertozzi F, Fischer PD, Hutchinson KA et al (2023) Associations between cognitive function and acl injury-related biomechanics: a systematic review. *Sports Health*. <https://doi.org/10.1177/19417381221146557>
5. Bielitzki R, Behrendt T (2022) Behrens M et al Blutflussrestriktionstraining zur akuten und chronische Schmerzreduktion in der orthopädischen Rehabilitation. *B&G Bewegungstherapie Gesundheitssport* 38:96
6. Buckthorpe M, La Rosa G, Della Villa F (2019a) Restoring knee extensor strength after anterior cruciate ligament reconstruction: a clinical commentary. *Int J Sports Phys Ther* 14:159
7. Buckthorpe M (2019b) Optimising the late-stage rehabilitation and return-to-sport training and testing process after acl reconstruction. *Sports Med* 49:1043
8. Buford TW, Rossi SJ, Smith DB, Warren AJ (2007) A comparison of periodization models during nine weeks with equated volume and intensity for strength. *J Strength Cond Res* 21(4):1245–1250. <https://doi.org/10.1519/R-20446.1>
9. Bullock GS, Sell TC, Zarega R et al (2022) Kinesiophobia, knee self-efficacy, and fear avoidance beliefs in people with acl injury: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 52:3001
10. Burgess LC, Arundel J, Wainwright TW (2019) The effect of preoperative education on psychological, clinical and economic outcomes in elective spinal surgery: a systematic review. *Healthcare*. <https://doi.org/10.3390/healthcare7010048>
11. Clapp IM, Nwachukwu BU, Beck EC, Rasio JP, Alter T, Allison B, Nho SJ (2020) What is the role of kinesiophobia and pain catastrophizing in outcomes after hip arthroscopy for femoroacetabular impingement syndrome? *Arthrosc Sports Med Rehabil* 2(2):e97–e104. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2019.12.001>
12. Cook CE, Zhou L, Bolognesi M et al (2022) Does surgery for concomitant cruciate and meniscus injuries increase or decrease subsequent comorbidities at 2 years? *J Knee Surg* 35:1063
13. Cuyul-Vasquez I, Alvarez E, Riquelme A et al (2022) Effectiveness of unilateral training of the uninjured limb on muscle strength and knee function of patients with anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis of cross-education. *J Sport Rehabil* 31:605
14. Diemer F (2021) Update temperaturmessung. *Sportphysiotherapie* 9:92
15. Ebert JR, Smith A, Janes G et al (2019) Association between isokinetic knee strength and perceived function and patient satisfaction with sports and recreational ability after matrix-induced autologous chondrocyte implantation. *Orthop J Sports Med* 19:2325967119885873
16. Edwards P, Ackland T, Ebert J (2014) Clinical rehabilitation guidelines for matrix-induced autologous chondrocyte implantation on the tibiofemoral joint. *J Orthop Sports Phys Ther* 44:102
17. Frey-Law LA, Bohr NL, Sluka KA et al (2016) Pain sensitivity profiles in patients with advanced knee osteoarthritis. *Pain* 157:1988
18. Georgoulis JD, Melissaridou D, Patras K et al (2023) Neuromuscular activity of the lower extremities during running, landing and changing-of-direction movements in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a review of electromyographic studies. *J Exp Orthop* 10:43
19. Girdwood MA, Patterson BE, Crossley KM et al (2023) Hip rotation muscle strength implicated in the progression of early post-traumatic osteoarthritis: a longitudinal evaluation up to 5 years following ACL reconstruction. *Phys Ther Sport* 63:17
20. Gokeler A, Nijmeijer EM, Heuvelmans P et al (2023) Motor learning principles during rehabilitation after anterior cruciate ligament injury. *Arthroscopie*. <https://doi.org/10.1007/s00142-023-00606-1>
21. Grooms DR, Chaput M, Simon JE et al (2023) Combining neurocognitive and functional tests to improve return-to-sport decisions following acl reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther*. <https://doi.org/10.2519/jospt.2023.11489>
22. Hambly K, Bobic V, Wondrasch B, van Assche D, Marlovits S (2006) Autologous chondrocyte implantation postoperative care and rehabilitation: science and practice. *Am J Sports Med* 34(6):S. 1020–S. 1038. <https://doi.org/10.1177/0363546505281918>
23. Heir S, Nerhus TK, Røtterud JH, Løken S, Ekland A, Engebretsen L, Arøen A (2010) Focal cartilage defects in the knee impair quality of life as much as severe osteoarthritis: a comparison of knee injury

Rehabilitation after cartilage regenerative surgery. What do surgeons and therapists need to know?

Rehabilitation after cartilage regenerative surgery is crucial for the quality of the developing regenerating tissue and the clinical outcome; however, there is still a lack of good quality studies demonstrating this and the individual useful measures in the rehabilitation process. Many aspects of the proposed rehabilitation protocols are based on expert opinions, applied biomechanics and basic research. This article summarizes the current evidence and recommendations for rehabilitation after cartilage regenerative surgery and can provide a framework for optimal exercise selection and progression, expectations, patient motivation and necessary lifestyle adjustments and consideration of possible pain-driving factors. The article places particular emphasis on the time-based and criteria-based planning and management of follow-up treatment, taking the individual factors that influence healing into account.

Keywords

Criteria-based · Pain Drivers Management Model · International Classification of Functioning, Disability and Health · Maturation phase · Rehabilitation protocols

- and osteoarthritis outcome score in 4 patient categories scheduled for knee surgery. *Am J Sports Med* 38(2):S. 231–S. 237. <https://doi.org/10.1177/0363546509352157>
24. Hirschmüller A, Schoch W, Baur H, Wondrasch B, Konstantinidis L, Südkamp, Nobert P, Niemeyer P (2018) Rehabilitation before regenerative cartilage knee surgery. A new prehabilitation guideline based on the best available evidence. *Arch Orthop Trauma Surg.* <https://doi.org/10.1007/s00402-018-3026-6>
 25. Hirschmüller A, Baur H, Braun S et al (2011) Rehabilitation after autologous chondrocyte implantation for isolated cartilage defects of the knee. *Am J Sports Med* 39:2686
 26. Hirschmüller A, Andres T, Schoch W et al (2017) Quadriceps strength in patients with isolated cartilage defects of the knee. *Orthop J Sports Med* 26:2325967117703726
 27. Jakobsen TL, Thorborg K, Fisker J et al (2022) Blood flow restriction added to usual care exercise in patients with early weight bearing restrictions after cartilage or meniscus repair in the knee joint: a feasibility study. *J Exp Orthop* 9:101
 28. Kakavas G, Forelli F, Malliaropoulos N, Hewett TE, Tsaklis P (2023) Periodization in anterior cruciate ligament rehabilitation: new framework versus old model? A clinical commentary. *IJSPT* 18(2):541–546
 29. Karnes JM, Harris JD, Griesser MJ et al (2013) Continuous passive motion following cartilage surgery: does a common protocol exist? *Physician Sportsmed* 41:53
 30. Kuenze C, Hertel J, Saliba S et al (2015) Clinical thresholds for quadriceps assessment following acl reconstruction. *J Sport Rehabil* 24:36
 31. Li M, Yin H, Yan Z et al (2022) The immune microenvironment in cartilage injury and repair. *Acta Biomaterialia* 140:23
 32. Lixandrao ME, Ugrinowitsch C (2018) Berton R et al Magnitude of muscle strength and mass adaptations between high-load resistance training versus low-load resistance training associated with blood-flow restriction: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 48:361
 33. Lorenz DS, Reiman MP, Walker JC (2010) Periodization: current review and suggested implementation for athletic rehabilitation. *Sports Health* 2(6):509–518. <https://doi.org/10.1177/19417381110375910>
 34. Luque-Suarez A, Martinez-Calderon J, Falla D (2019) Role of kinesiophobia on pain, disability and quality of life in people suffering from chronic musculoskeletal pain: a systematic review. *Br J Sports Med* 53(9):S. 554–S. 559. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098673>
 35. Mason JS, Crowell MS, Brindle RA et al (2022) The effect of blood flow restriction training on muscle atrophy following meniscal repair or chondral resoration surgery in active duty military: a randomized controlled trial. *J Sport Rehabil* 31:77
 36. Memmel C, Koch M, Szymiski D et al (2022b) Standardized rehabilitation of individual approach? A retrospective analysis of early rehabilitation protocols after isolated posterior cruciate ligament reconstruction. *J Pers Med* 12:1299
 37. Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DWD et al (2012) Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J Appl Physiol* 113:71
 38. Mithoefer K, Hamby K, Logerstedt D, Ricci M, Silvers H, Villa Della S (2012) Current concepts for rehabilitation and return to sport after knee articular cartilage repair in the athlete. *J Orthop Sports Phys Ther* 42(3):254–273. <https://doi.org/10.2519/jospt.2012.3665>
 39. Munro AG, Herrington LC (2011) Between-session reliability of four hop tests and the agility T-test. *J Strength Cond Res* 25(5):1470–1477. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d83335>
 40. Nho SJ, Pensak MJ, Seigerman DA, Cole BJ (2010) Rehabilitation after autologous chondrocyte implantation in athletes. *Clin Sports Med* 29:267–282
 41. Niemeyer P, Porichis S, Salzmann G, Südkamp NP (2012) What patients expect about Autologous Chondrocyte Implantation (ACI) for treatment of cartilage defects at the knee joint. *CARTILAGE* 3(1):S. 13–S. 19. <https://doi.org/10.1177/1947603511415840>
 42. Niethammer TR, Loitzsch A, Pietschmann MF et al (2017) Analysis of graft maturation after autologous chondrocyte implantation with T2 mapping. *Orthop J Sports Med* 5(4_suppl4):2325967117S0015
 43. Niethammer TR, Aurich M, Brucker P et al (2023) Nachbehandlung nach Knorpeltherapie – eine Empfehlung der AG Klinische Geweberegeneration der DGOU. *Z Orthop Unfall.* <https://doi.org/10.1055/a-2206-7242>
 44. Norte G, Rush J, Sherman D et al (2021) Arthrogenic muscle inhibition: best evidence, mechanisms, and theory for treating the unseen in clinical rehabilitation. *J Sport Rehabil* 31:717
 45. Paatela T, Vasara A, Nurmi H et al (2021) Biomechanical changes of repair tissue after autologous chondrocyte implantation at long-term follow-up. *CARTILAGE* 13:10855
 46. Pairet-de-Fontenay B, Willy RW, Elias ARC et al (2019) Running biomechanics in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *Sports Med* 49:1411
 47. Paravlic AH, Slimani M, Tod D et al (2018) Effects and dose-response relationships of motor imagery practice on strength development in healthy adult populations: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 48:1165
 48. Pei YA, Chen S, Pei M (2022) The essential anti-angiogenic strategies in cartilage engineering and osteoarthritic cartilage repair. *Cell Mol Life Sci* 79:71
 49. Pietrosimone B, Pfeiffer SJ, Harkey MS et al (2019) Quadriceps weakness associates with greater T1p relaxation time in the medial femoral articular cartilage 6 months following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27:2632
 50. Pietrosimone B, Lepley AS, Kuenze C et al (2022) Arthrogenic muscle inhibition following anterior cruciate ligament injury. *J Sport Rehabil* 31:694
 51. Piskin D, Benjaminse A, Dimitrakis P et al (2022) Neurocognitive and neurophysiological functions related to acl: a framework for neurocognitive approaches in rehabilitation and return-to-sports tests. *Sports Health* 14:549
 52. Piusi R, Berghdal T, Sundemo D et al (2022) Self-reported symptoms of depression and anxiety after ACL injury: a systematic review. *Orthop J Sports Med.* <https://doi.org/10.1177/23259671211066493>
 53. Reiman MP, Lorenz DS (2011) Integration of strength and conditioning principles into a rehabilitation program. *Int J Sports Phys Ther* 6(3):241–253
 54. Reinold MM, Wilk KE, Macrina LC, Dugas JR, Cain EL (2006) Current concepts in the rehabilitation following articular cartilage repair procedures in the knee. *J Orthop Sports Phys Ther* 36:774–794
 55. Rose GL, Skinner TL, Mielke GI et al (2021) The effect of exercise intensity on chronic inflammation: a systematic review and meta-analysis. *J Sci Med Sports* 24:345
 56. Russo LR, Benedetti MG, Mariani E et al (2017) The videoinstight method: improving early results following total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25:2967
 57. Ryan D, Fullen B, Rio E et al (2021) Effect of action observation therapy in the rehabilitation of neurologic and musculoskeletal conditions: a systematic review. *Arch Rehabil Res Clin Transl* 3:100106
 58. Silbernagel KG, Thomeé R, Eriksson BI, Karlsson J (2007) Continued sports activity, using a pain-monitoring model, during rehabilitation in patients with Achilles tendinopathy: a randomized controlled study. *Am J Sports Med* 35(6):897–906. <https://doi.org/10.1177/0363546506298279>

59. Smidt G (1973) Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *J Biomech* 6:79
60. Schmitt LC, Quatman CE, Paterno MV et al (2014) Functional outcomes after surgical management of articular cartilage lesions in the knee: a systematic literature review to guide postoperative rehabilitation. *J Orthop Sports Phys Ther* 44:565
61. Scotti C, Gobbi A, Karnatzikos G et al (2016) Cartilage repair in the inflamed joint: considerations for biological augmentation towards tissue regeneration. *Tissue Eng* 22:149
62. Toonstra JL, Howell D, English RA, Lattermann C, Mattacola CG (2016) Patient experiences of recovery after autologous chondrocyte implantation: a qualitative study. *J Athl Train* 51(12):S. 1028–S. 1036. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.12.12>
63. Tousignant-Laflamme Y (2017) Rehabilitation management of low back pain—it's time to pull it all together! *JPR* 10:2373
64. Truong LK, Mosewich AD, Holt CJ et al (2020) Psychological, social and contextual factors across recovery stages following a sport-related knee injury: a scoping review. *Br J Sports Med* 54:114
65. Walker JM, Brunst CL, Chaput M et al (2021) Integrating neurocognitive challenges into injury prevention training: a clinical commentary. *Phys Ther Sport* 51:8
66. Walker A, Hing W, Gough S, Lorimer A (2022) Such a massive part of rehab is between the ears'; barriers to and facilitators of anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation: a qualitative focus group analysis. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 14(1):106. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00499-x>
67. Wegle L, Migliorini F, Leroux T et al (2022) The effects of blood flow restriction in patients undergoing knee surgery. *Am J Sports Med* 50:2824
68. Wondrasch B (2016) Rückkehr zum Sport nach Eingriffen am Gelenkknorpel im Kniegelenk. *Arthroskopie* 29:108
69. Wondrasch B, Arøen A, Jan Harald R, Høysveen T, Bølstad K, Risberg MA (2013) The feasibility of a 3-month active rehabilitation program for patients with knee full-thickness articular cartilage lesions: the Oslo Cartilage Active Rehabilitation and Education Study. *J Orthop Sports Phys Ther* 43(5):S. 310–S. 324. <https://doi.org/10.2519/jospt.2013.4354>
70. World Health Organization (2013) How to use the ICF: A practical manual for using the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF). Exposure draft for comment. WHO, Geneva, S 127
71. World Health Organization International classification of functioning, disability and health. <http://apps.who.int/classifications/icfbrowser/>
72. Yousefabad HA, Niyazi A, Alaei S et al (2021) Anti-inflammatory effects of exercise on metabolic syndrome patients: a systematic review and meta-analysis. *Biol Res Nursing* 23:280
73. Zaffagnini S, Russo RL, Muccioli GMM et al (2013) The videoinsight method: improving rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction—a preliminary study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21:851
74. Wagner KR, Kaiser JT, DeFroda SF et al (2022) Rehabilitation, restrictions, and return to sport after cartilage procedures. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 4:e115
75. Toyooka S, Moatshe G, Persson A et al (2023) Return to pivoting sports after cartilage repair surgery of the knee: a scoping review. *CARTILAGE* 14:17

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.