

Nachbehandlung nach Knorpeltherapie am Kniegelenk – eine Empfehlung der AG Klinische Geweberegeneration der DGOU

Follow-up Treatment after Cartilage Therapy of the Knee Joint – a Recommendation of the DGOU Clinical Tissue Regeneration Working Group

Autorinnen/Autoren

Thomas R. Niethammer¹, Matthias Aurich^{2,3}, Peter U. Brucker^{4,5}, Svea Faber¹, Frank Diemer⁶, Matthias F. Pietschmann^{1,7}, Wolfgang Schoch⁸, Wolfgang Zinser^{9,10}, Peter E. Müller¹

Institute

- 1 Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Muskuloskelettales Universitätszentrum München (MUM), Klinikum der Universität München, LMU München, Deutschland
- 2 Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Halle (Saale), Deutschland
- 3 Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, BG Klinikum Bergmannstrost, Halle (Saale), Deutschland
- 4 ATOS Klinik München, Deutschland
- 5 Biomechanik im Sport, Fakultät für Sport- und Gesundheitswissenschaften, Technische Universität München, Deutschland
- 6 DIGOTOR GbR, Brackenheim, Deutschland
- 7 OrthoPraxis Oberhaching, Oberhaching, Deutschland
- 8 PULZ im Rieselfeld, Freiburg, Deutschland
- 9 Orthoexpert, Knittelfeld, Österreich
- 10 Metagil Physikalisches Ambulatorium, Knittelfeld, Österreich

Schlüsselwörter

Nachbehandlung, Knorpeltherapie, Knie, Rehabilitation

Key words

aftercare, cartilage therapy, knee, rehabilitation

eingereicht 24.2.2023

akzeptiert nach Revision 1.11.2023

Bibliografie

Z Orthop Unfall

DOI 10.1055/a-2206-7242

ISSN 1864-6697

© 2023, Thieme. All rights reserved.

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

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Thomas Niethammer
Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Muskuloskelettales Universitätszentrum München (MUM), Klinikum der Universität München, LMU München
Marchioninistraße 15
81377 München, Deutschland
thomas.niethammer@med.uni-muenchen.de

 English version at: <https://doi.org/10.1055/a-2206-7242>.

ZUSAMMENFASSUNG

Die erste Nachbehandlungsempfehlung der AG Klinische Geweberegeneration der DGOU stammt aus dem Jahr 2012. Neue wissenschaftliche Evidenz und veränderte Rahmenbedingungen machten eine Aktualisierung der Nachbehandlungsempfehlungen nach Knorpeltherapie erforderlich.

Im Rahmen einer mehrstufigen Mitgliederbefragung wurde ein Konsensus erzielt, der gemeinsam mit der wissenschaftlichen Evidenz die Basis für die vorliegende Nachbehandlungsempfehlung gibt.

Das maßgebliche Kriterium für die Nachbehandlung ist weiterhin die Defektlokalisierung. Dabei wird zwischen femorotibialen und patellofemorale Defekten unterschieden. Zudem werden nun auch weiterführende Kriterien bez. der Knorpeldefekte berücksichtigt (stabiler Knorpelrand, Lage außerhalb der Hauptbelastungszone) und auf die unterschiedlichen Verfahren der Knorpeltherapie (z. B. osteochondrale Transplantation, Mincing Cartilage) eingegangen.

Die vorliegende aktualisierte Nachbehandlungsempfehlung beinhaltet unterschiedliche Aspekte der Nachbehandlung, beginnend vom frühen perioperativen Management bis zur Sportfreigabe und Wiederaufnahme von Kontaktsport nach erfolgter Knorpeltherapie.

ABSTRACT

The first follow-up treatment recommendation from the DGOU's Clinical Tissue Regeneration working group dates back to 2012. New scientific evidence and changed frame-

work conditions made it necessary to update the follow-up treatment recommendations after cartilage therapy.

As part of a multi-stage member survey, a consensus was reached which, together with the scientific evidence, provides the basis for the present follow-up treatment recommendation.

The decisive criterion for follow-up treatment is still the defect localisation. A distinction is made between femorotibial and patellofemoral defects. In addition, further criteria regarding

cartilage defects are now also taken into account (stable cartilage edge, location outside the main stress zone) and the different methods of cartilage therapy (e.g. osteochondral transplantation, minced cartilage) are discussed.

The present updated recommendation includes different aspects of follow-up treatment, starting with early perioperative management through to sports clearance and resumption of contact sports after cartilage therapy has taken place.

Einleitung

Die Behandlung von Knorpelschäden im Kniegelenk hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und bietet immer mehr Möglichkeiten zur Wiederherstellung der Gelenkfunktion und Linderung von Schmerzen. Eine wichtige Phase in diesem Prozess ist die Nachbehandlung nach einer Knorpeltherapie am Kniegelenk. Nachdem der Eingriff erfolgreich durchgeführt wurde, spielt die Nachbehandlung eine entscheidende Rolle, um optimale Ergebnisse zu erzielen und eine schnelle Genesung zu gewährleisten.

Die Nachbehandlung nach einer Knorpeltherapie am Kniegelenk umfasst verschiedene Maßnahmen und Verfahren, die darauf abzielen, den Heilungsprozess zu unterstützen, die Stabilität des Knorpels zu verbessern und die Belastbarkeit des Kniegelenkes wiederherzustellen. Sie spielt eine wichtige Rolle bei der Förderung der Regeneration des behandelten Knorpelgewebes und der Vermeidung von Komplikationen.

Die vorliegende Arbeit hat sich mit verschiedenen Aspekten der Nachbehandlung auseinandergesetzt, wie z. B. die Dauer der Teilbelastung nach einer Knorpeltherapie am Kniegelenk, die Verwendung von Hilfsmitteln oder die Ruhigstellung postoperativ. Zudem wurden die Einflussfaktoren auf die Nachbehandlung wie z. B. die Lokalisation der Knorpelschäden, die unterschiedlichen knorpeltherapeutischen Verfahren oder eine zeit- bzw. kriterienbasierte Nachbehandlung diskutiert, um abschließend eine konkrete Empfehlung zur Nachbehandlung geben zu können.

Die Arbeitsgemeinschaft (AG) klinische Geweberegeneration der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU) hat bislang mehrere Empfehlungen zur Behandlung von Knorpeldefekten am Kniegelenk veröffentlicht [1, 2]. Zuletzt wurde die Empfehlung zur Indikationsstellung im Jahr 2022 aktualisiert [3]. Die bislang einzige Empfehlung zur Nachbehandlung stammt aus dem Jahr 2012 und beschränkte sich auf die Nachbehandlung nach Knorpelzelltransplantation [4].

Aufgrund der sich stets verändernden Rahmenbedingungen und aufgrund des zunehmenden wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns war eine Aktualisierung der Empfehlung der AG Klinische Geweberegeneration zur Nachbehandlung nach Knorpeltherapie am Kniegelenk erforderlich. Die nun vorliegende aktualisierte Nachbehandlungsempfehlung beinhaltet nun alle derzeit gängigen knorpeltherapeutischen Verfahren am Kniegelenk.

Methoden

Die vorliegende Empfehlung basiert auf einer 3-stufigen Umfrage, die innerhalb der Mitglieder der AG Klinische Geweberegeneration durchgeführt wurde. Die Konsensusgruppe setzte sich zusammen aus insgesamt 34 Mitgliedern der AG Klinische Geweberegeneration, die sich seit vielen Jahren sowohl wissenschaftlich als auch klinisch mit der Knorpeltherapie am Kniegelenk beschäftigen. Darunter waren sowohl Chirurgen als auch Physiotherapeuten.

Im Sinne eines Konsensusverfahrens wurde eine mehrstufige Mitgliederbefragung durchgeführt, wie sie bereits in anderen Konsensusverfahren angewandt wurde [3, 5]. Im Rahmen der 1. Umfrage wurde zunächst eine Bestandsaufnahme bzw. eine Beschreibung des Istzustands erhoben. Zudem wurden dabei strittige thematische Aspekte identifiziert. In einer 2. Umfrage wurden daraus 14 Aussagen formuliert, die mit der Angabe der wissenschaftlichen Evidenz versehen wurden. Die Aussagen konnten mit 5 Antwortmöglichkeiten beantwortet werden, von der Zustimmung bis zur kompletten Ablehnung inkl. einer Kommentarfunktion.

Basierend auf den Ergebnissen und Kommentaren wurden in der 3. Umfrage 14 finale Aussagen formuliert und zur Abstimmung gestellt, wobei nur noch 2 Antwortmöglichkeiten (Zustimmung/Ablehnung) ohne Kommentarfunktion möglich waren. Konsensus bestand bei einer Zustimmungsrate von >75%. Bei >95% bestand ein hoher Konsensus.

Ergebnisse

Folgend werden die Ergebnisse der Umfrage dargestellt. Die Rücklaufquote lag bei 91,2%. Thematisch wurden bei der aktuellen Empfehlung die folgenden Schwerpunkte gesetzt: „Grundprinzipien“, „frühe Nachbehandlung“ innerhalb der ersten 6 Wochen postoperativ und „späte Nachbehandlung“ nach 6 Wochen postoperativ (► **Tab. 1**).

Grundprinzipien

Bei der Art der Nachbehandlung wurde diskutiert, ob eine standardisierte oder phasenbasierte Nachbehandlung erfolgen soll. Die phasenbasierte Nachbehandlung umfasst dabei unterschiedliche Phasen, die aufeinander aufbauen. Jede Phase konzentriert sich auf bestimmte Ziele und Aktivitäten, die den Heilungsprozess fördern und die Belastbarkeit des Gewebes schrittweise erhöhen sollen. Die Therapie wird dabei individuell an den Patienten angepasst und kann Übungen, manuelle Techniken, Gerätetraining und andere Rehabilitationsmethoden umfassen.

► **Tab. 1** Ergebnisse des Delphi-Verfahrens.

Anzahl	finale Aussagen Delphi-Verfahren	Zustimmung	Evidenz
1	Nach einer Knorpeltherapie am Kniegelenk wird eine standardisierte Nachbehandlung nach festen Zeitintervallen empfohlen (Bsp.: 6 Wochen, 3, 6, 12 Monate postoperativ).	83,9%	Case Series
2	Bei engmaschiger klinischer und radiologischer (MRT) Verlaufskontrolle kann die Nachbehandlung nach Knorpeltherapie individuell befundabhängig erfolgen.	83,9%	Expert Opinion
3	Die Nachbehandlung nach einer Knorpeltherapie sollte in Abhängigkeit zur Defektlokalisierung (femorotibial/patellofemoral) durchgeführt werden. Es wird femorotibial eine 6-wöchige Teilbelastung mit 15 kg und Abrollbewegung empfohlen. Eine Einschränkung der Beweglichkeit durch eine Orthese kann individuell erfolgen, abhängig vom Defektausmaß und der Defektlokalisierung. Bei Defekten außerhalb der Belastungszone, bei Contained Defekten sowie nach OCT-Plastik kann eine schnellere Aufbelastung mit 15 kg TB für 4 Wochen erfolgen.	96,8%	Expert Opinion
4	Für die Nachbehandlung nach Knorpeltherapie patellofemoral wird eine Bewegungslimitierung mittels Hartrahmenorthese und Flexionslimitation von 30°, dann 60° und anschließend 90° für je 2 Wochen empfohlen, die Vollbelastung in Streckstellung ist erlaubt. Bei Defekten außerhalb der Belastungszone, bei Contained Defekten sowie nach OCT-Plastik kann eine schnellere Aufbelastung erfolgen mit freier Beweglichkeit, Vollbelastung in der Ebene und Teilbelastung beim Treppengehen für 6 Wochen.	87,1%	Expert Opinion
5	Es wird postoperativ bei der Krankengymnastik ein geschlossenes System empfohlen.	93,5%	Expert Opinion
6	Es wird postoperativ eine passive CPM-Schiene für 6 Wochen empfohlen (insgesamt 3 h/Tag).	93,5%	Case Series
7	Nach einer Knorpelzelltransplantation ist eine Ruhigstellung des Kniegelenkes für 24–48 h in Streckstellung sinnvoll zum Schutz des Transplantates.	93,5%	Expert Opinion
8	Nach einer Knorpeltherapie ist eine MRT-Untersuchung nach 12 Monaten postoperativ sinnvoll zur Qualitätskontrolle bzw. bei Beschwerden auch eher.	80,6%	Case Series
9	Die intraartikuläre Gabe von PRP und Hyaluronsäure ist nach einer Knorpeltherapie optional möglich.	100%	Expert Opinion
10	Eine EMS-Behandlung nach Knorpeltherapie erscheint zur Prävention des Muskelabbaus sinnvoll.	77,4%	Expert Opinion
11	Eine intraartikuläre Drainage ist nach Knorpeltherapie nicht zwangsläufig notwendig, Drainagen mit Sog sollten vermieden werden.	100%	Case Series
12	Nach 3 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden leichte knieschonenden Sportarten wie Fahrradfahren und Schwimmen erlaubt.	100%	Case Series
13	Nach 6 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden Low-Impact-Sportarten erlaubt (Walken, Wandern, Fahrradfahren, Tanzen, Golf, Langlauf).	96,7%	Case Series
14	Nach 12 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden High-Impact-Sportarten erlaubt (Squash, Fußball, Handball, Volleyball, Basketball, Ski alpin, Joggen).	93,5%	Case Series

OCT: osteochondrale Transplantation; TB: Teilbelastung; CPM: Continuous Passive Motion; EMS: Elektromyostimulation; PRP: Platelet-rich Plasma

Bei der standardisierten Nachbehandlung handelt es sich hingegen um einen strukturierten Behandlungsansatz, der auf einem festgelegten Behandlungsprotokoll basiert. Dieses Protokoll definiert bestimmte Vorgaben für die Nachbehandlung, die bspw. in einem festen zeitlichen Rahmen erfolgen.

Die Mitgliederbefragung ergab einen Konsensus für eine standardisierte Nachbehandlung. Es wird eine Nachbehandlung nach festen Zeitintervallen empfohlen (83,9% Zustimmung, ► **Tab. 1**). Diese kann bspw. nach 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten und 12 Monaten postoperativ durchgeführt werden. Prinzipiell ist jedoch auch eine vom klinischen Befund abhängige individualisierte Nachbehandlung möglich. Diese sollte jedoch nur bei Sicherstellung einer engmaschigen klinischen und radiologischen Verlaufskontrolle mittels Magnetresonanztomografie (MRT) durchgeführt werden (83,9% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Frühe Nachbehandlung < 6 Wochen postoperativ

Wie bereits in der bisherigen Nachbehandlungsempfehlung ist das wesentliche Kriterium für die Nachbehandlung die Lokalisation des behandelten Knorpeldefektes. Dabei wird zwischen femorotibialen und patellofemorale Defekten unterschieden. Es gab hierzu einen starken Konsensus mit einer Zustimmung von 96,8% (► **Tab. 1**).

Bei femorotibialen Knorpeldefekten wird eine 6-wöchige Teilbelastung mit 15–20 kg und Abrollbewegungen empfohlen. Eine Beweglichkeitseinschränkung durch eine Orthese kann individuell erfolgen, ist aber abhängig vom Defektausmaß und von der Defektlokalisierung (96,8% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Bei patellofemorale Knorpeldefekten wird eine Flexionslimitation von initial 30°, dann von 60°, abschließend 90° für jeweils 2 Wochen empfohlen mittels Hartrahmenorthese. Die Vollbelastung in Streckstellung ist erlaubt (87,1% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, die Nachbehandlung zu verkürzen. Dies sollte jedoch nur bei Knorpeldefekten außerhalb der Belastungszone, bei Contained Defekten mit einem stabilen Knorpelrand oder nach einer osteochondralen Transplantation erfolgen. Bei femorotibialen Knorpeldefekten erfolgt in diesem Fall eine Teilbelastung mit 15–20 kg für 4 Wochen. Eine schnellere Aufbelastung ist auch bei patellofemorale Defekten prinzipiell möglich mit einer freien Beweglichkeit, mit Vollbelastung in der Ebene und einer Teilbelastung beim Treppengehen für 6 Wochen.

Es zeigte sich eine 100%ige Zustimmung, dass intraartikuläre Drainagen nicht zwangsläufig notwendig sind und wenn möglich, vermieden werden sollten. Sollte eine Drainage in das Gelenk eingelegt werden, so sollte diese ohne Sog sein, um die Knorpeltherapie nicht zu gefährden (► **Tab. 1**).

Ebenso hat sich die AG Klinische Geweberegeneration zu 100% dafür ausgesprochen, dass intraartikuläre Injektionen nach einer Knorpeltherapie prinzipiell durchgeführt werden können; bspw. mit Platelet-rich Plasma (PRP) oder Hyaluronsäure (► **Tab. 1**).

Für alle knorpeltherapeutischen Verfahren wird eine CPM-Behandlung (CPM: Continuous Passive Motion) für 6 Wochen empfohlen. Diese sollte etwa 3 h pro Tag durchgeführt werden (93,5% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Zudem wird die Durchführung einer Kryotherapie sowie eine physiotherapeutische Behandlung im geschlossenen System empfohlen (93,5% Zustimmung, ► **Tab. 1**). Zusätzlich kann eine Elektrostimulationsbehandlung durchgeführt werden (77,4% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Lediglich nach einer Knorpelzelltransplantation wird eine Ruhigstellung für 24–48 h postoperativ in Streckstellung zum Schutz des Transplantates empfohlen (93,5% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Späte Nachbehandlung > 6 Wochen postoperativ

Ein starker Konsensus konnte bei dem Zeitpunkt der Wiederaufnahme der sportlichen Betätigung erzielt werden. Die AG Klinische Geweberegeneration empfiehlt den Beginn mit knieschonenden Sportarten nach frühestens 3 Monaten postoperativ. Dazu werden explizit Fahrradfahren und Schwimmen empfohlen (100% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Low-Impact-Sportarten wie Walken, Wandern, Tanzen, Golf oder Langlauf sollten frühestens nach 6 Monaten nach einer Knorpeltherapie begonnen werden (96,7% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Zum Schutz des Knorpelregenerats wird empfohlen, mit High-Impact-Sportarten erst 12 Monate postoperativ nach einer Knorpeltherapie zu beginnen. Dazu werden bspw. gezählt: Squash, Fußball, Handball, Volleyball, Basketball, Ski alpin und Joggen (93,5% Zustimmung, ► **Tab. 1**). Bei der osteochondralen Transplantation ist eine Wiederaufnahme von High-Impact-Sportarten früher möglich, da hierbei kein Knorpelregenerat geschont werden muss. Diesbezüglich ist die osteochondrale Transplantation gerade für Profisportler mit kleinen osteochondralen Defekten geeignet, die idealerweise mit einem Zylinder versorgt werden können.

Eine MRT-Untersuchung nach einer Knorpeltherapie wird nach 12 Monaten postoperativ zur Qualitätskontrolle empfohlen (80,6% Zustimmung, ► **Tab. 1**).

Diskussion

Grundprinzipien

Die Nachbehandlung knorpelregenerativer Eingriffe, insbesondere nach autologer Chondrozytentransplantation (ACT), ist ein wissenschaftlich gut untersuchtes Thema. So existieren mehrere randomisiert-kontrollierte Studien mit einem Follow-up von bis zu 10 Jahren [6, 7, 8, 9, 10], die verschiedene Nachbehandlungsschemata verglichen. Darüber hinaus fokussierten sich einige kontrollierte Studien auf den Einfluss des Sportlevels und eines dementsprechend adaptierten Sportprogramms auf das Outcome und den Return to Sports [11, 12, 13].

Im Rahmen dieser Studie sprach man sich für eine standardisierte Nachbehandlung aus mit festen Zeitintervallen, d. h., dass man sich an der Wundheilung bzw. an der postoperativen Entwicklung des Knorpelregenerats orientiert. Des Weiteren erfordern manche trainingstherapeutischen Anpassungen (z. B. Vergrößerung der Muskelmasse) einen entsprechenden zeitlichen Rahmen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass eine exzessive Entzündungsreaktion das Knorpelregenerat und damit das Nachbehandlungsergebnis gefährdet [14, 15, 16], was eine kriterienbasierte Nachbehandlung erfordert. Kriterienbasiert bedeutet, dass für die Progression innerhalb der Nachbehandlung bestimmte klinische (z. B. Reizzustand des Gelenks) oder funktionelle (z. B. regelrechtes, symmetrisches Gangbild) Meilensteine erreicht werden müssen.

Ein zeit- und kriterienbasiertes Arbeiten schließt sich nicht aus, sondern ergänzt sich und ermöglicht eine sichere Rückkehr zur Arbeit oder zum Sport. Sollte es der aktuelle Reizzustand des betroffenen Gelenks zulassen, so erfolgt weiter eine Anleitung zur Aktivierung und Kräftigung von Schlüssel Muskeln, um das postoperative Defizit so gering wie möglich zu halten.

Klinische Kriterien, die über die Progression der Nachbehandlung bestimmen:

- Schmerz: Zu Beginn sollte die Schmerzintensität im „grünen“ Bereich liegen (0–2/10). Des Weiteren sollten angeleitete Aktivitäten keine persistierenden Schmerzen auslösen. Spätestens am nächsten Morgen sollten sie auf das alte Niveau gesunken sein. Im weiteren Verlauf können höhere Schmerzintensitäten („gelb“) statthaft sein. Der „rote“ Bereich stellt keinen biopositiven Rahmen dar.
- Temperatur: Hyperthermien über dem betroffenen Gelenk können Anzeichen von exzessiven inflammatorischen Prozessen sein. Die Hauttemperatur sollte daher regelmäßig gemessen werden und sollte im Seitenvergleich nicht über 2° ansteigen [17]. Diese Temperaturmessung kann mittels Infrarotthermometer erfolgen.
- Schwellung: Eine Schwellungszunahme von mehr als 1 cm im Vergleich zum Ausgangszustand gilt als relevante Steigerung und sollte zu einer Modifikation der Belastungskonfiguration führen. Gemessen wird direkt vor der Trainingseinheit als Ausgangswert und direkt nach der Trainingseinheit als Vergleichswert. Die Messung sollte am liegenden Bein mit entspannter Quadrizepsmuskulatur oberhalb der Patella im Recessus suprapatellaris durchgeführt werden.

Funktionelle Kriterien, die über die Progression der Nachbehandlung bestimmen:

- Funktionelle Testverfahren: motorische Leistungen können einerseits durch qualitative (z. B. Beinachse bei der Landung) oder quantitative (z. B. Sprungweite) Kriterien/Tests überprüft und gesteuert werden. Häufig verwendete Testverfahren sind das Landing Errors Scoring System oder Sprungtests (Zwei- oder Einbeinweitsprungtest)
- Kraft: Die Maximalkraft hat sowohl für die alltags- als auch die sportartspezifische Funktion eine übergeordnete Bedeutung. Werte können mit Fitnessgeräten (1 Wiederholungsmaximum), handgehaltenen Dynamometern oder auch Isokineten ermittelt werden.

Frühe Nachbehandlung

Das Ausmaß der postoperativen Belastung des therapierten Beines spielt in der frühen Rehabilitation eine wichtige Rolle. Bereits in einer Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2006, die Nachbehandlungsempfehlungen verschiedener Zentren untersuchte, wurde sichtbar, dass der Zeitpunkt der erlaubten Vollbelastung zwischen den verschiedenen Zentren stark variierte; bei patellofemorale Eingriffen zwischen 6 h und 12 Wochen [18].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgehalten, dass die Nachbehandlung nach einer Knorpeltherapie in Abhängigkeit zur Defektlokalisierung (femorotibial/patellofemorale) durchgeführt werden sollte. Diese Empfehlung wird vor dem Hintergrund erstellt, dass die Patella in voller Streckung bis etwa 20° Beugung nicht und/oder nur in geringem Ausmaß mit der Trochlea artikuliert [19]. 2003 wurde im „Oscell-Protokoll“ eine direkte postoperative Vollbelastung bei einer erlaubten Range of Motion (ROM) von 0/0/30 empfohlen [20]. Diese Empfehlung wurde auch in einem Konsensus US-amerikanischer Orthopäden im Jahre 2020 ausgesprochen [21]. Diesbezüglich wird bei patellofemorale Knorpelschäden eine Flexionslimitation von 30°, dann 60° und anschließend 90° für je 2 Wochen empfohlen mit Vollbelastung in Streckstellung mittels Hartraahmenorthese. Eine wissenschaftliche Untersuchung im Sinne einer kontrollierten Studie oder einer gezielten klinischen und/oder radiologischen Aufarbeitung dieser frühen Vollbelastung hat bisher nicht stattgefunden.

Bei femorotibiale Knorpelschäden sollte hingegen eine 6-wöchige Teilbelastung mit 15 kg und Abrollbewegung durchgeführt werden um die Regeneratbildung nicht zu gefährden durch eine frühzeitige Belastung. 2008 haben Ebert et al. das Outcome nach 8 vs. 11 Wochen Teilbelastung anhand einer randomisiert-kontrollierten Studie untersucht, wobei eine kontinuierliche Steigerung der Belastung um 10–20% pro Woche ab Woche 2 möglich war [22]. Bei einem Follow-up von 3 Monaten kamen sie zu dem Ergebnis, dass es durch die zügigere Aufbelastung zum einen nicht zu Schäden am Transplantat gekommen ist und zum anderen die Patienten in der 8-Wochen-Gruppe weniger Schmerzen hatten und eine höhere Aktivität aufwiesen. Auch im 10-Jahres-Follow-up zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des funktionellen Outcomes oder der Versagensrate [7].

Wondrasch et al. untersuchten unter einem ebenfalls randomisiert-kontrollierten Studiendesign eine 6-wöchige vs. eine 8-wöchige

Teilbelastung mit einem Follow-up von 2 Jahren und stellten hier keine Unterschiede im MR-morphologischen und funktionellen Outcome fest [10]. Diese 6- vs. 8-wöchige Teilbelastung, auch hier wieder mit kontinuierlicher Aufbelastung um 10–20% wöchentlich, publizierten Ebert et al. 2020 mit einem 5-Jahres-Follow-up und kamen auch hier zu dem Ergebnis, dass die schnellere Aufbelastung nicht mit erhöhten Risiken für das Transplantat verbunden ist [7].

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass ein Konsensus bestand, dass die Dauer der Nachbehandlung bei der osteochondrale Transplantation und bei Defekten außerhalb der Belastungszone bzw. bei Contained Defekten auf 4 Wochen verkürzt werden kann, da das Transplantat weniger gefährdet ist.

Des Weiteren sprach man sich für eine unmittelbare postoperative Ruhigstellung der Kniegelenke für 24–48 h in Streckstellung zum Schutz des Transplantates aus. Eine postoperative Bettruhe, wie sie in der vorangegangenen Empfehlung zur Knorpelzelltransplantation empfohlen wurde, ist nach Meinung der Experten nicht mehr erforderlich.

Continuous Passive Motion

Bezüglich der Behandlung mittels CPM-Schiene entschied man sich für eine 6-wöchige Therapie postoperativ. Der Einsatz von CPM-Schienen findet sich in einer Vielzahl von Studienprotokollen und Nachbehandlungsempfehlungen verschiedener Gesellschaften nach knorpelregenerativen Eingriffen wieder [7, 10, 20, 21]. Zu ihrem Einsatz nach knorpelregenerativen Therapien existieren jedoch keine randomisiert-kontrollierten Studien. In einzelnen Studien konnten jedoch sowohl funktionelle Vorteile als auch subjektive und histologische Vorteile anhand von Knorpelbiopsien hinsichtlich der hyalinen Knorpelqualität gezeigt werden [23]. Hierbei wurde die CPM-Schiene bis zu 8 h täglich eingesetzt [24, 25].

Bezüglich der Behandlung mithilfe intraartikulärer Medikamente besteht derzeit ein erheblicher Mangel an Studien, die die Wirksamkeit nach einer Knorpeltherapie belegen. Diesbezüglich wurde die Empfehlung zurückhaltend formuliert mit einer 100%igen Zustimmung, dass die intraartikuläre Gabe von PRP und Hyaluronsäure ist nach einer Knorpeltherapie optional möglich ist.

Hingegen sollte auf eine Drainage mit Sog nach einer Knorpeltherapie verzichtet werden. Generell wird das Einlegen einer Drainage als nicht zwangsläufig notwendig erachtet, da keine Studien vorliegen, die den Nutzen belegen.

Späte Nachbehandlung

Physiotherapeutische Aspekte Es wird empfohlen, dass die postoperative physiotherapeutische Behandlung im geschlossenen System erfolgen soll. Übungen im geschlossenen System (fest fixierter Fuß) erhielten mit 93,5% ebenfalls eine hohe Zustimmung im Gegensatz zum offenen System (frei beweglicher Fuß). Der Hintergrund hierfür sind vermutlich historisch fest verankerte Ängste vor übermäßigen Scherkräften bei Übungen in der offenen kinetischen Kette. Vom biomechanischen Gesichtspunkt ist die Generierung von Scher- und Kompressionskräften nicht von einem bestimmten System abhängig, sondern von der Übungsausführung im jeweiligen System [26, 27]. Betrachtet man darüber hinaus das persistierende Quadrizepsdefizit von operativ versorgten

Knorpelpatienten [28], den funktionellen Nutzen von isolierten Übungen im offenen System auf einzelne Muskeln [29], die unterschiedlichen Aktivierungsmuster von verschiedenen Trainingsübungen [30] und auch die bessere Toleranz isolierter Übungen bei Patienten mit einem hohen BMI [31], so sollte in der Zukunft für Übungen in beiden Systemen eine Empfehlung ausgesprochen werden.

Die elektrische Muskelstimulation (EMS) nach Knorpeltherapie erhält mit 77,4% im Vergleich eine eher geringe Zustimmung. Daher wurde die folgende Empfehlung zur EMS-Therapie eher zurückhaltend formuliert. Eine EMS-Behandlung nach Knorpeltherapie erscheint zur Prävention des Muskelabbaus sinnvoll. Die Literatur zeigt, dass präoperativ deutliche Kraftdefizite der wichtigsten Gelenkstabilisatoren vorhanden sind [32, 33] und diese auch Jahre nach der Operation persistieren können [28, 34]. Die daraus resultierenden funktionellen Defizite führen zu schlechteren Werten der subjektiv angegebenen Leistungsfähigkeit, geringeren Return-to-Sports-Raten und früherer Degeneration [35, 36, 37]. Dabei scheint die arthrogene Muskelinhibition nach Operation eine entscheidende Rolle zu spielen [38, 39, 40]. Trotz guter Evidenz, die EMS als begleitende Maßnahme zur willkürlichen Aktivierung, Muskelkräftigung und funktionellen Wiederherstellung einzusetzen [41, 42, 43], zeigt sich, dass der klinische Wert dieser Methode nicht allgemein anerkannt ist. Spector et al. beschreiben in ihrer Übersichtsarbeit, wie ein Best-Practice-Modell für den Einsatz in der postoperativen Nachsorge aussehen kann [44]. Die EMS sollte als begleitende Maßnahme zur Verbesserung der Aktivierung wichtiger Gelenkstabilisatoren empfohlen werden.

Sportliche Belastung Für eine erfolgreiche Nachbehandlung scheint jedoch auch die präoperative sportliche Aktivität eine Rolle zu spielen: So wiesen Patienten, die sich vor Symptombeginn 1–3-mal wöchentlich sportlich betätigt haben, ein besseres funktionelles Ergebnis auf, als Patienten, die sich lediglich 1–3-mal pro Monat sportlich betätigten [12].

In den von Ebert et al. publizierten Studienprotokollen waren propriozeptive Übungen, Radfahren, Gehen und Übungen in geschlossener kinematischer Kette ab der 7. Woche erlaubt; die Nutzung des Ruderergometers, eines Cross-Trainers sowie anspruchsvollere Übungen in offener und geschlossener Kette ab dem 3. Monat zugelassen [6]. Ab dem 6. Monat konnte mit dem Joggen auf dem Laufband begonnen werden und die Schwierigkeit der propriozeptiven und maximalkrafttrainierenden Übungen gesteigert werden, sodass ein Wiedereinstieg in Vollkontaktsportarten ab dem 12. Monat ermöglicht werden sollte. Ähnliche Meilensteine in der Rehabilitation des 1. Jahres nach knorpelregenerativen Therapien werden auch von anderen Gruppen auf Basis biomechanischer Untersuchungen in evidenzbasierten Rehabilitations- oder Studienprotokollen vorgeschlagen [11, 45, 46, 47]. Diesbezüglich bestand Konsensus, dass mit knieschonenden Sportarten nach 3 Monaten und mit Low-Impact-Sportarten nach 6 Monaten begonnen werden kann.

Die Sportfreigabe ist auch davon abhängig, welche Sportart durchgeführt wird. Wir wissen aus klinischen Studien, dass der Beginn von High-Impact-Sportarten innerhalb der ersten 12 Monate nach einer Knorpelzelltransplantation zu schlechteren klinischen Ergebnissen führt [13]. Diesbezüglich sprach man sich im Rahmen

dieser Empfehlung für eine Wiederaufnahme von High-Impact-Sportarten erst nach 12 Monaten postoperativ aus.

Die Rückkehr zum Sport bzw. zum Wettkampf (Return to Sports/Competition) ist eine wichtige Messgröße bei Gelenkverletzungen, da Sportler besonders daran interessiert sind, möglichst schnell zum Aktivitätsniveau wie vor der Verletzung (Pre-Injury Level) zurückzukehren. Obwohl bei jedem chirurgischen Eingriff viele Ergebnisvariablen berücksichtigt werden, konzentriert sich die Variable „Rückkehr zum Sport“ auf eine aktive Population und kann auf die sportspezifischen Ziele des Patienten zugeschnitten werden [48].

Trotz insgesamt zufriedenstellender Ergebnisse nach Knorpelreparatur scheint es je nach verwendeter Operationstechnik Unterschiede in den Ergebnissen zu geben [49]. In einer anderen Metaanalyse von Hurley et al. [50] wurde auch festgestellt, dass OCT (osteocondrale Transplantation) die höchste Rückkehr zum Sport aufweist (88,2%), während osteocondrale Allograft-Transplantation (OCT) die niedrigste Quote (77,1%) aufweist. Die Rückkehr zum Spielniveau vor der Verletzung war am höchsten bei OCT (79,3 %) und am niedrigsten bei ACT (57,3 %). Der Zeitpunkt der Rückkehr zum Spiel war in dieser Studie ähnlich wie in der vorherigen Überprüfung, wobei OCT die kürzeste Zeit bis zur Rückkehr (4,9 Monate) und ACT die längste Zeit bis zur Rückkehr (11,6 Monate) zeigte.

In einer systematischen Literaturrecherche von Campbell et al. [51] zur Knorpelreparatur in Kniegelenken von Athleten wurden 20 Level-I- bis -IV-Studien mit insgesamt 1117 Patienten ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass OCT und ACT im Vergleich zu BMS (bone marrow stimulation) statistisch signifikant höhere Rückkehr Raten zum Sport hatten (89% und 84% im Vergleich zu 75%).

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass auch unterschiedliche Nachbehandlungsschemata die Rückkehr zum Sport beeinflussen kann. Es besteht eine große Heterogenität bez. der Richtlinien für das „Return to Play“ nach Knorpelrekonstruktion des Sportlerkniees. Obwohl in der Literatur viele verschiedene Kriterien verwendet werden, sind die meisten zeitbasiert. Obwohl zeitbasierte Kriterien einfach und leicht zu befolgen sind, erfüllen sie nicht die individuellen Bedürfnisse jedes Athleten. Objektive und subjektive Patientenwerte wie Schmerz, Schwellung, Bewegungsumfang und Kraft sollten berücksichtigt werden, wenn eine Rückkehr zum Sport in Erwägung gezogen wird. Return-to-Play-Richtlinien wurden in der Literatur zur vorderen Kreuzbandruptur ausführlicher untersucht [52].

Bildgebungsbasierte Kriterien wurden als Mittel zur Bewertung der Gewebeheilung an der Stelle der Knorpelreparatur bez. der Frage ausgewertet, ob sie ausreichend sind, um physiologische sportliche Belastungen zu berücksichtigen. Fortschritte in der morphologischen und biochemischen MRT haben zu einer besseren Visualisierung und Bewertung der Qualität von Knorpelreparaturgewebe geführt und können offenbar bei der chirurgischen Nachsorge und der Freigabe für die Rückkehr zum Sport nützlich sein [53]. Dabei ist insbesondere auf die Integrität und die Signalintensität des Knorpelreparaturgewebes zu achten. Des Weiteren kann ein defektbezogenes Knochenmarködem ein Hinweis sein, dass eine übermäßige Belastung des Knorpelreparaturgewebes vorliegt.

Die Durchführung eines umfassenden postoperativen Rehabilitationsprogramms mithilfe eines multidisziplinären Teams ist ebenfalls entscheidend für eine sichere und rechtzeitige Rückkehr zum Sport. Dabei sollte für jeden Athleten ein individueller Ansatz verwendet werden, der die Verletzungscharakteristik, die verwendete Operationstechnik, die Symptome und den psychologischen Status des Athleten, wie auch sportspezifische Anforderungen berücksichtigt. Ein schrittweises Programm, das sich auf die Erfüllung klar definierter Leistungskriterien statt auf feste Zeitpunkte stützt, bietet Spitzensportlern den effektivsten Weg, um zum Sport zurückzukehren [54].

Magnetresonanztomografie

Im Rahmen dieser Empfehlung sprach man sich mit 80,6% Zustimmung dafür aus, eine MRT-Untersuchung nach 12 Monaten postoperativ durchzuführen, unabhängig von der oben beschriebenen engmaschigen klinischen und radiologischen Nachkontrolle mit individueller Nachbehandlung. Die MRT-Untersuchung nach 12 Monaten sollte als Qualitätskontrolle für die Knorpeltherapie durchgeführt werden. Sollten Beschwerden im 1. Jahr nach einer Knorpeltherapie auftreten, wird eine frühere MRT-Untersuchung empfohlen.

Bezüglich der Bildgebung wird im Folgenden die Empfehlung basierend auf der Literatur gegeben. Das Kniegelenk sollte immer in 3 Ebenen untersucht werden. Die Standard-MRT-Diagnostik des Kniegelenkes erfolgt nativ zur Beurteilung von Knochen, Sehnen/Bändern, Menisken und Knorpel. Kontrastmittel kommt nur bei bestimmten Fragestellungen zum Einsatz.

Für eine adäquate MRT-Diagnostik am Kniegelenk wird ein Field of View (FOV) von 160 mm empfohlen, die Schichtdicke sollte ≤ 3 mm betragen bei einer In-Plane-Ortsauflösung von mindestens $0,6 \times 0,6$, besser aber $\leq 0,4 \times 0,4$ mm.

Die Basis der Kniegelenk-MRT-Diagnostik ist die Anwendung von wassersensitiven Sequenzen mit Elimination des Fettsignals. Die häufigsten angewandten Verfahren sind die relaxationszeitabhängige (STIR) und frequenzselektive (FS = fatsat, SPIR) Fettsignalunterdrückung.

Die Sensitivität für frische Verletzungen an Bändern, Sehnen und Muskeln, für Knochenmarkveränderungen und die Knorpelbeurteilung wird durch Fettsättigungstechniken verbessert. Daher sollten mindestens 2 Ebenen mit Fettsättigung gemessen werden.

Gradientenechosequenzen, wie z.B. die True-FISP-Sequenz (True Fast Imaging with Steady Precession) mit Water Excitation, können für die Knorpelbeurteilung hilfreich sein.

Die STIR-Sequenz (Short Tau Inversion Recovery) ist die Sequenz mit der höchsten Wassersensitivität und daher exzellent zur Detektion von Knochenmarködemen geeignet. Allerdings weist sie ein vergleichsweise schlechtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, eine schlechtere Auflösung und eine erhöhte Schichtdicke auf. Daher erfordert die STIR i. d. R. als zusätzliche Anwendung eine anatomisch höher auflösende Sequenz.

Wenigstens eine native T1-gewichtete (T)SE-Sequenz sollte angefertigt werden, um ggf. Zufallsbefunde des Knochenmarks besser differenzieren zu können.

Die intravenöse Gabe von Kontrastmittel in der Kniegelenk-MRT ist speziellen Fragestellungen zur additiven Tumor-, Entzündungs-

und Infektdiagnostik vorbehalten. Die Angaben basieren auf Empfehlungen der AG Bildgebende Verfahren des Bewegungsapparates (AG BVB) der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG) [55].

Limitationen

Diese Empfehlung stützt sich auf die vorliegende Literatur zu den einzelnen Themen sowie auf die Meinung von Experten der Knorpeltherapie am Kniegelenk. Diesbezüglich ist die Aussagefähigkeit der vorliegenden Empfehlung durch den Mangel an randomisierten kontrollierten Studien limitiert. Der Evidenzgrad mehrerer Aussagen beruht somit auf der Meinung von Experten und kann nicht durch klinische Studien belegt werden.

Im Rahmen dieser Empfehlung wurde eine mehrstufige Umfrage zur Schwerpunktsetzung und Erstellung der finalen Aussagen durchgeführt. Diese Art der Konsensusbildung wurde in der Vergangenheit auch in anderen Studien genutzt und erscheint für ein promemororientiertes Vorgehen mehrerer Teilnehmer geeignet [3, 5].

Zusammenfassung und Fazit für die Praxis

- Nach einer Knorpeltherapie am Kniegelenk wird eine standardisierte Nachbehandlung nach festen Zeitintervallen empfohlen (Bsp.: 6 Wochen, 3, 6, 12 Monate postoperativ).
- Bei engmaschiger klinischer und radiologischer (MRT) Verlaufskontrolle kann die Nachbehandlung nach Knorpeltherapie individuell befundabhängig erfolgen.
- Die Nachbehandlung nach einer Knorpeltherapie sollte in Abhängigkeit zur Defektlokalisierung (femorotibial/patellofemorale) durchgeführt werden.
- Es wird femorotibial eine 6-wöchige Teilbelastung mit 15 kg und Abrollbewegung empfohlen. Eine Einschränkung der Beweglichkeit durch eine Orthese kann individuell erfolgen abhängig vom Defektausmaß und der Defektlokalisierung.
- Bei Defekten außerhalb der Belastungszone, bei Contained Defekten sowie nach OCT-Plastik kann eine schnellere Aufbelastung mit 15 kg TB für 4 Wochen erfolgen.
- Für die Nachbehandlung nach Knorpeltherapie patellofemorale wird eine Bewegungslimitierung mittels Hartrahmenorthese und Flexionslimitation von 30°, dann 60° und anschließend 90° für je 2 Wochen empfohlen, die Vollbelastung in Streckstellung ist erlaubt.
- Bei Defekten außerhalb der Belastungszone, bei Contained Defekten sowie nach OCT-Plastik kann eine schnellere Aufbelastung erfolgen mit freier Beweglichkeit, Vollbelastung in der Ebene und Teilbelastung beim Treppengehen für 6 Wochen.
- Es wird postoperativ bei der Krankengymnastik ein geschlossenes System empfohlen.
- Es wird postoperativ eine passive CPM-Schiene für 6 Wochen empfohlen (insgesamt 3 h/Tag).
- Nach einer Knorpelzelltransplantation ist eine Ruhigstellung des Kniegelenkes für 24–48 h in Streckstellung sinnvoll zum Schutz des Transplantates.
- Nach einer Knorpeltherapie ist eine MRT-Untersuchung nach 12 Monaten postoperativ sinnvoll zur Qualitätskontrolle bzw. bei Beschwerden auch eher.

- Die intraartikuläre Gabe von PRP und Hyaluronsäure ist nach einer Knorpeltherapie optional möglich.
- Eine EMS-Behandlung nach Knorpeltherapie erscheint zur Prävention des Muskelabbaus sinnvoll.
- Eine intraartikuläre Drainage ist nach Knorpeltherapie nicht zwangsläufig notwendig, Drainagen mit Sog sollten vermieden werden.
- Nach 3 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden leichte knieschonende Sportarten wie Fahrradfahren/Schwimmen erlaubt.
- Nach 6 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden Low-Impact-Sportarten erlaubt (Walken, Wandern, Fahrradfahren, Tanzen, Golf, Langlauf).
- Nach 12 Monaten nach einer Knorpeltherapie werden High-Impact-Sportarten erlaubt (Squash, Fußball, Handball, Volleyball, Basketball, Ski alpin, Joggen).

Interessenkonflikt

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

Literatur

- [1] Behrens P, Bosch U, Bruns J et al. [Indications and implementation of recommendations of the working group "Tissue Regeneration and Tissue Substitutes" for autologous chondrocyte transplantation (ACT)]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 2004; 142: 529–539. doi:10.1055/s-2004-832353
- [2] Niemeyer P, Andereya S, Angele P et al. [Autologous chondrocyte implantation (ACI) for cartilage defects of the knee: a guideline by the working group "Tissue Regeneration" of the German Society of Orthopaedic Surgery and Traumatology (DGOU)]. *Z Orthop Unfall* 2013; 151: 38–47. doi:10.1055/s-0032-1328207
- [3] Niemeyer P, Albrecht D, Aurich M et al. Empfehlungen der AG Klinische Geweberegeneration zur Behandlung von Knorpelschaden am Kniegelenk. *Z Orthop Unfall* 2023; 161: 57–64. doi:10.1055/a-1663-6807
- [4] Pietschmann MF, Horng A, Glaser C et al. [Post-treatment rehabilitation after autologous chondrocyte implantation: State of the art and recommendations of the Clinical Tissue Regeneration Study Group of the German Society for Accident Surgery and the German Society for Orthopedics and Orthopedic Surgery]. *Unfallchirurg* 2014; 117: 235–241. doi:10.1007/s00113-012-2293-x
- [5] Guenther D, Pfeiffer T, Petersen W et al. Treatment of Combined Injuries to the ACL and the MCL Complex: A Consensus Statement of the Ligament Injury Committee of the German Knee Society (DKG). *Orthop J Sports Med* 2021; 9: 23259671211050929. doi:10.1177/23259671211050929
- [6] Ebert JR, Edwards PK, Fallon M et al. Two-Year Outcomes of a Randomized Trial Investigating a 6-Week Return to Full Weightbearing After Matrix-Induced Autologous Chondrocyte Implantation. *Am J Sports Med* 2017; 45: 838–848. doi:10.1177/0363546516673837
- [7] Ebert JR, Fallon M, Ackland TR et al. Minimum 10-Year Clinical and Radiological Outcomes of a Randomized Controlled Trial Evaluating 2 Different Approaches to Full Weightbearing After Matrix-Induced Autologous Chondrocyte Implantation. *Am J Sports Med* 2020; 48: 133–142. doi:10.1177/0363546519886548
- [8] Ebert JR, Fallon M, Wood DJ et al. An accelerated 6-week return to full weight bearing after matrix-induced autologous chondrocyte implantation results in good clinical outcomes to 5 years post-surgery. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2021; 29: 3825–3833. doi:10.1007/s00167-020-06422-6
- [9] Ebert JR, Fallon M, Zheng MH et al. A randomized trial comparing accelerated and traditional approaches to postoperative weightbearing rehabilitation after matrix-induced autologous chondrocyte implantation: findings at 5 years. *Am J Sports Med* 2012; 40: 1527–1537. doi:10.1177/0363546512445167
- [10] Wondrasch B, Risberg MA, Zak L et al. Effect of accelerated weightbearing after matrix-associated autologous chondrocyte implantation on the femoral condyle: a prospective, randomized controlled study presenting MRI-based and clinical outcomes after 5 years. *Am J Sports Med* 2015; 43: 146–153. doi:10.1177/0363546514554910
- [11] Della Villa S, Kon E, Filardo G et al. Does intensive rehabilitation permit early return to sport without compromising the clinical outcome after arthroscopic autologous chondrocyte implantation in highly competitive athletes? *Am J Sports Med* 2010; 38: 68–77. doi:10.1177/0363546509348490
- [12] Kreuz PC, Steinwachs M, Erggelet C et al. Importance of sports in cartilage regeneration after autologous chondrocyte implantation: a prospective study with a 3-year follow-up. *Am J Sports Med* 2007; 35: 1261–1268. doi:10.1177/0363546507300693
- [13] Niethammer TR, Müller PE, Safi E et al. Early resumption of physical activities leads to inferior clinical outcomes after matrix-based autologous chondrocyte implantation in the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2014; 22: 1345–1352. doi:10.1007/s00167-013-2583-z
- [14] Li M, Yin H, Yan Z et al. The immune microenvironment in cartilage injury and repair. *Acta Biomater* 2022; 140: 23–42. doi:10.1016/j.actbio.2021.12.006
- [15] Khella CM, Horvath JM, Asgarian R et al. Anti-Inflammatory Therapeutic Approaches to Prevent or Delay Post-Traumatic Osteoarthritis (PTOA) of the Knee Joint with a Focus on Sustained Delivery Approaches. *Int J Mol Sci* 2021; 22: 8005. doi:10.3390/ijms22158005
- [16] Scotti C, Gobbi A, Karnatzikos G et al. Cartilage Repair in the Inflamed Joint: Considerations for Biological Augmentation Toward Tissue Regeneration. *Tissue Eng Part B Rev* 2016; 22: 149–159. doi:10.1089/ten.TEB.2015.0297
- [17] Diemer F. Temperaturmessung. *Sportphysio* 2021; 09: 92–97. doi:10.1055/a-1338-7538
- [18] Hambly K, Bobic V, Wondrasch B et al. Autologous chondrocyte implantation postoperative care and rehabilitation: science and practice. *Am J Sports Med* 2006; 34: 1020–1038. doi:10.1177/0363546505281918
- [19] McGinty G, Irrgang JJ, Pezullo D. Biomechanical considerations for rehabilitation of the knee. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2000; 15: 160–166. doi:10.1016/s0268-0033(99)00061-3
- [20] Bailey A, Goodstone N, Roberts S et al. Rehabilitation After Oswestry Autologous-Chondrocyte Implantation: The OsCell Protocol. *J Sport Rehabil* 2003; 12: 104–118. doi:10.1123/jsr.12.2.104
- [21] Flanigan DC, Sherman SL, Chillelli B et al. Consensus on Rehabilitation Guidelines among Orthopedic Surgeons in the United States following Use of Third-Generation Articular Cartilage Repair (MACI) for Treatment of Knee Cartilage Lesions. *Cartilage* 2021; 13: 1782S–1790S. doi:10.1177/1947603520968876
- [22] Ebert JR, Robertson WB, Lloyd DG et al. Traditional vs accelerated approaches to post-operative rehabilitation following matrix-induced autologous chondrocyte implantation (MACI): comparison of clinical, biomechanical and radiographic outcomes. *Osteoarthritis Cartilage* 2008; 16: 1131–1140. doi:10.1016/j.joca.2008.03.010
- [23] Rogan S, Taeymans J, Hirschmüller A et al. [Effect of continuous passive motion for cartilage regenerative surgery – a systematic literature review]. *Z Orthop Unfall* 2013; 151: 468–474. doi:10.1055/s-0033-1350707

- [24] Marder RA, Hopkins G, jr, Timmerman LA. Arthroscopic microfracture of chondral defects of the knee: a comparison of two postoperative treatments. *Arthroscopy* 2005; 21: 152–158. doi:10.1016/j.arthro.2004.10.009
- [25] Minas T, Gomoll AH, Solhpour S et al. Autologous chondrocyte implantation for joint preservation in patients with early osteoarthritis. *Clin Orthop Relat Res* 2010; 468: 147–157. doi:10.1007/s11999-009-0998-0
- [26] Smidt GL. Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *J Biomech* 1973; 6: 79–92. doi:10.1016/0021-9290(73)90040-7
- [27] Kulas AS, Hortobagyi T, DeVita P. Trunk position modulates anterior cruciate ligament forces and strains during a single-leg squat. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2012; 27: 16–21. doi:10.1016/j.clinbiomech.2011.07.009
- [28] Schmitt LC, Quatman CE, Paterno MV et al. 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* 2014; 44: 565–578. doi:10.2519/jospt.2014.4844
- [29] Buckthorpe M, La Rosa G, Villa FD. Restoring Knee Extensor Strength after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Clinical Commentary. *Int J Sports Phys Ther* 2019; 14: 159–172
- [30] Stien N, Saeterbakken AH, Andersen V. Electromyographic Comparison of Five Lower-Limb Muscles between Single- and Multi-Joint Exercises among Trained Men. *J Sports Sci Med* 2021; 20: 56–61. doi:10.52082/jssm.2021.56
- [31] Bennell KL, Dobson F, Roos EM et al. Influence of Biomechanical Characteristics on Pain and Function Outcomes From Exercise in Medial Knee Osteoarthritis and Varus Malalignment: Exploratory Analyses From a Randomized Controlled Trial. *Arthritis Care Res (Hoboken)* 2015; 67: 1281–1288. doi:10.1002/acr.22558
- [32] Hirschmüller A, Andres T, Schoch W et al. Quadriceps Strength in Patients With Isolated Cartilage Defects of the Knee: Results of Isokinetic Strength Measurements and Their Correlation With Clinical and Functional Results. *Orthop J Sports Med* 2017; 5: 2325967117703726. doi:10.1177/2325967117703726
- [33] Mosler AB, Kemp J, King M et al. Standardised measurement of physical capacity in young and middle-aged active adults with hip-related pain: recommendations from the first International Hip-related Pain Research Network (IHiPRN) meeting, Zurich, 2018. *Br J Sports Med* 2020; 54: 702–710. doi:10.1136/bjsports-2019-101457
- [34] Kierkegaard S, Mechlenburg I, Lund B et al. Is hip muscle strength normalised in patients with femoroacetabular impingement syndrome one year after surgery?: Results from the HAFAl cohort. *J Sci Med Sport* 2019; 22: 413–419. doi:10.1016/j.jsams.2018.10.004
- [35] Pietrosimone B, Lepley AS, Harkey MS et al. Quadriceps Strength Predicts Self-reported Function Post-ACL Reconstruction. *Med Sci Sports Exerc* 2016; 48: 1671–1677. doi:10.1249/MSS.0000000000000946
- [36] Pietrosimone B, Pfeiffer SJ, Harkey MS et al. Quadriceps weakness associates with greater T1rho 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
- [37] Nawasreh Z, Logerstedt D, Cummer K et al. Functional performance 6 months after ACL reconstruction can predict return to participation in the same preinjury activity level 12 and 24 months after surgery. *Br J Sports Med* 2018; 52: 375. doi:10.1136/bjsports-2016-097095
- [38] Lepley AS, Lepley LK. Mechanisms of Arthrogenic Muscle Inhibition. *J Sport Rehabil* 2022; 31: 707–716. doi:10.1123/jsr.2020-0479
- [39] Rice DA, McNair PJ, Lewis GN et al. Quadriceps arthrogenic muscle inhibition: the effects of experimental knee joint effusion on motor cortex excitability. *Arthritis Res Ther* 2014; 16: 502. doi:10.1186/s13075-014-0502-4
- [40] Hart JM, Pietrosimone B, Hertel J et al. Quadriceps activation following knee injuries: a systematic review. *J Athl Train* 2010; 45: 87–97. doi:10.4085/1062-6050-45.1.87
- [41] Norte G, Rush J, Sherman D. Arthrogenic Muscle Inhibition: Best Evidence, Mechanisms, and Theory for Treating the Unseen in Clinical Rehabilitation. *J Sport Rehabil* 2022; 31: 717–735. doi:10.1123/jsr.2021-0139
- [42] Logerstedt DS, Scalzitti DA, Bennell KL et al. Knee Pain and Mobility Impairments: Meniscal and Articular Cartilage Lesions Revision 2018. *J Orthop Sports Phys Ther* 2018; 48: A1–A50. doi:10.2519/jospt.2018.0301
- [43] Hasegawa S, Kobayashi M, Arai R et al. Effect of early implementation of electrical muscle stimulation to prevent muscle atrophy and weakness in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Electromyogr Kinesiol* 2011; 21: 622–630. doi:10.1016/j.jelekin.2011.01.005
- [44] Spector P, Laufer Y, Elboim Gabyzon M et al. Neuromuscular Electrical Stimulation Therapy to Restore Quadriceps Muscle Function in Patients After Orthopaedic Surgery: A Novel Structured Approach. *J Bone Joint Surg Am* 2016; 98: 2017–2024. doi:10.2106/JBJS.16.00192
- [45] Edwards PK, Ackland T, Ebert JR. Clinical rehabilitation guidelines for matrix-induced autologous chondrocyte implantation on the tibiofemoral joint. *J Orthop Sports Phys Ther* 2014; 44: 102–119. doi:10.2519/jospt.2014.5055
- [46] Edwards PK, Ackland TR, Ebert JR. Accelerated weightbearing rehabilitation after matrix-induced autologous chondrocyte implantation in the tibiofemoral joint: early clinical and radiological outcomes. *Am J Sports Med* 2013; 41: 2314–2324. doi:10.1177/0363546513495637
- [47] Hirschmüller A, Baur H, Braun S et al. Rehabilitation after autologous chondrocyte implantation for isolated cartilage defects of the knee. *Am J Sports Med* 2011; 39: 2686–2696. doi:10.1177/0363546511404204
- [48] Skelley NW, Kurtenbach C, Kimber K et al. Return-to-Sport Review for Current Cartilage Treatments. *J Knee Surg* 2021; 34: 39–46. doi:10.1055/s-0040-1721669
- [49] Krych AJ, Pareek A, King AH et al. Return to sport after the surgical management of articular cartilage lesions in the knee: a meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; 25: 3186–3196. doi:10.1007/s00167-016-4262-3
- [50] Hurley ET, Davey MS, Jamal MS et al. Return-to-Play and Rehabilitation Protocols following Cartilage Restoration Procedures of the Knee: A Systematic Review. *Cartilage* 2021; 13: 907S–914S. doi:10.1177/1947603519894733
- [51] Campbell AB, Pineda M, Harris JD et al. Return to Sport After Articular Cartilage Repair in Athletes' Knees: A Systematic Review. *Arthroscopy* 2016; 32: 651–668.e1. doi:10.1016/j.arthro.2015.08.028
- [52] Davies GJ, McCarty E, Provencher M et al. ACL Return to Sport Guidelines and Criteria. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2017; 10: 307–314. doi:10.1007/s12178-017-9420-9
- [53] Trattnig S, Winalski CS, Marlovits S et al. Magnetic Resonance Imaging of Cartilage Repair: A Review. *Cartilage* 2011; 2: 5–26. doi:10.1177/1947603509360209
- [54] Mithoefer K, Hambly K, Logerstedt D et al. Current concepts for rehabilitation and return to sport after knee articular cartilage repair in the athlete. *J Orthop Sports Phys Ther* 2012; 42: 254–273. doi:10.2519/jospt.2012.3665
- [55] Anonymous. Protokollempfehlungen der AG Bildgebende Verfahren des Bewegungsapparates (AG BVB) der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG) zu Messesequenzen für die Gelenk-MRT. *Rofo* 2018; 190: 186–190. doi:10.1055/s-0043-125412