



Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie  
Klinikum rechts der Isar  
Technische Universität München  
(Univ.-Prof. Dr. med. Andreas B. Imhoff)

# **Quantitative Analyse der dynamischen Außenmeniskusextrusion**

Philipp W. Winkler

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Florian Eyer

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Andreas B. Imhoff
2. apl. Prof. Dr. Chlodwig Kirchhoff

Die Dissertation wurde am 13.08.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 04.01.2022 angenommen.



## **Vorbemerkung**

Bei der vorliegenden Dissertationsschrift handelt es sich gemäß § 6 Abs. 2 der TUM-Promotionsordnung (mit Wirkung vom 1. Januar 2014) um eine publikationsbasierte Dissertation. Aus dem Promotionsprojekt sind zwei Veröffentlichungen mit einer Erstautorenschaft (Originalarbeit in einem englischsprachigen, international verbreiteten Publikationsorgan, peer reviewed) des Doktoranden hervorgegangen. Die im Anhang 16.1 und 16.2 eingebundenen Veröffentlichungen wurden federführend vom Doktoranden abgefasst. Der Betreuer (Univ.-Prof. Dr. med. Andreas B. Imhoff) und Mentor (Univ.-Prof. Dr. med. Christian Fink) des Promotionsprojekts haben ihr schriftliches Einverständnis zur Verfassung einer publikationsbasierten Dissertation erteilt. Im Folgenden sind ein kurz gefasster Einleitungs-, Methoden- und Ergebnisteil des Promotionsprojekts sowie ein themenübergreifender Diskussionsteil mit Reflexion zur bestehenden Literatur zu finden. Eine detaillierte Erläuterung der Methodik sowie die entsprechenden Ergebnisse sind den beiden im Anhang eingebundenen Originalarbeiten zu entnehmen. Die jeweilige Zusammenfassung beinhaltet die relevantesten methodischen Aspekte und zugehörigen Resultate der beiden Originalarbeiten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Publikationsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>9</b>
4.1	Anatomische Grundlagen .....	10
4.2	Spezielle Anatomie des Außenmeniskus.....	12
4.3	Biomechanische Grundlagen.....	15
4.4	Klinische Relevanz des Außenmeniskusverlusts.....	18
<b>5</b>	<b>Fragestellung und Hypothesen .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>23</b>
6.1	Patient:innenrekrutierung.....	23
6.1.1	Veröffentlichung 1.....	23
6.1.2	Veröffentlichung 2.....	24
6.2	Operationstechnik (Veröffentlichung 1).....	24
6.3	Datenerhebung .....	25
6.3.1	Anamneseerhebung .....	25
6.3.2	Patient-Reported Outcomes (PROs).....	25
6.3.3	Klinische Untersuchung .....	26
6.3.4	Magnetresonanztomografie (MRT).....	27
6.3.5	Ultraschall.....	28
6.3.6	Bildanalyse .....	31
6.3.7	Präoperative Daten (Veröffentlichung 1) .....	33
6.4	Statistische Analyse .....	33
6.4.1	Veröffentlichung 1.....	33
6.4.2	Veröffentlichung 2.....	34
<b>7</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>35</b>
7.1	Veröffentlichung 1 .....	35
7.1.1	Demografische Daten .....	35
7.1.2	Außenmeniskusextrusion .....	36
7.1.3	Klinische Ergebnisse .....	36
7.1.4	Reliabilität .....	37
7.2	Veröffentlichung 2.....	37
7.2.1	Reliabilitätstestung.....	37
7.2.2	Validitätstestung .....	38

<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerung.....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassungen .....</b>	<b>46</b>
10.1	Veröffentlichung 1 („ <i>Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair</i> “) .....	46
10.2	Veröffentlichung 2 („ <i>Sonographic Evaluation of Lateral Meniscal Extrusion: Implementation and Validation</i> “).....	48
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
<b>13</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>51</b>
<b>15</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>61</b>
<b>16</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>62</b>
16.1	Veröffentlichung 1 .....	62
16.2	Veröffentlichung 2 .....	62
16.3	Fragebogen zur Erhebung validierter Patient-Reported Outcome Scores .....	62
16.4	IKDC – Formblatt zur Untersuchung des Kniegelenks .....	62

## 1 Zusammenfassung

**Hintergrund:** Die Kombination aus einer Ruptur des vorderen Kreuzbands (VKB) und eines Radiärisses des Außenmeniskushinterhorns (AM-HH) ist ein Verletzungsmuster, das in einer pathologischen Außenmeniskusextrusion (AME) resultiert. Die AME stellt einen objektiven Parameter zur Beurteilung der funktionellen Integrität des Außenmeniskus dar und wird standardmäßig mittels Magnetresonanztomografie (MRT) bestimmt.

**Ziel der Arbeit:** (1) Quantitative Analyse der dynamischen AME nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses des AM-HH. (2) Testung der Reliabilität und Validität einer standardisierten Ultraschall-basierten Messung der AME.

**Material und Methoden:** Eingeschlossen wurden Patient:innen nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses des AM-HH mit gesundem kontralateralen Kniegelenk (Gruppe 1) sowie freiwillige Proband:innen mit gesunden Kniegelenken (Gruppe 2). MRT- (Gruppe 1) und Ultraschall-Aufnahmen (Gruppe 1 + 2) beider Kniegelenke wurden in einem unbelasteten und belasteten Zustand (50 % des Körpergewichts) aufgenommen. Folgende Parameter wurden erhoben: absolute AME, Meniscal Body Extrusion Ratio und  $\Delta$ -Extrusion.

**Ergebnisse:** Zehn Patient:innen wurden in Gruppe 1 und elf Proband:innen in Gruppe 2 eingeschlossen. Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses des AM-HH führte im unbelasteten Zustand zu einer Abnahme der AME um 32 % ( $p = 0,033$ ). Die axiale Belastung bedingte eine Zunahme der AME um 22 % ( $p = 0,029$ ). Es konnten eine gute Interrater-Reliabilität (Intraklassenkorrelationskoeffizient [ICC], 0,904) und eine exzellente Intrarater-Reliabilität (ICC, 0,942) der Ultraschall-basierten Messung der AME festgestellt werden, wohingegen eine nur schwache Übereinstimmung mit MRT-basierten Messungen beobachtet wurde (ICC, 0,439).

**Schlussfolgerung:** Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und Außenmeniskusnaht ist zur Reduktion der AME und damit zum Erhalt des dynamischen Verhaltens des Außenmeniskus empfohlen. Die Ultraschall-basierte Messung der AME ist schnell, kostengünstig und zuverlässig, weist jedoch eine schwache Übereinstimmung zur MRT-basierten Messung auf.

## 2 Abstract

**Background:** Combined anterior cruciate ligament (ACL) injury and radial tear of the lateral meniscus result in pathologic lateral meniscal extrusion. Lateral meniscal extrusion can be used to assess meniscal function and is typically quantified by magnetic resonance imaging (MRI).

**Purpose:** (1) Quantitative analysis of lateral meniscal extrusion after ACL reconstruction and all-inside radial tear repair. (2) To assess the reliability and validity of a standardized ultrasound-based protocol to determine lateral meniscal extrusion.

**Methods:** Patients undergoing ACL reconstruction and all-inside radial tear repair of the lateral meniscus and had no history of contralateral knee injury (Group 1) and volunteers with no knee-related history (Group 2) were included. MRI (Group 1) and ultrasound (Group 1 + 2) images of both knees were acquired in an unloaded and loaded (axial compression equivalent to 50% of the body weight) condition. To assess lateral meniscal function, the following variables were collected: lateral meniscal extrusion, meniscal body extrusion ratio, and  $\Delta$ -extrusion.

**Results:** In total, 10 patients (Group 1) and 11 volunteers (Group 2) were included. Combined ACL reconstruction and all-inside radial tear repair of the lateral meniscus resulted in a statistically significant reduction in lateral meniscal extrusion in the unloaded condition (32%,  $p = 0.033$ ). Axial load application resulted in a statistically significant increase in lateral meniscal extrusion (22%,  $p = 0.029$ ). There was good interrater (intraclass correlation coefficient, 0.904) and excellent intrarater (intraclass correlation coefficient, 0.942) reliability of ultrasound-based measurements of lateral meniscal extrusion. In contrast, only poor agreement was found between ultrasound-based and MRI-based measurements of lateral meniscal extrusion (intraclass correlation coefficient, 0.439).

**Conclusion:** Combined ACL reconstruction and lateral meniscal radial tear repair is recommended to decrease lateral meniscal extrusion and preserve the dynamic behavior of the lateral meniscus. Ultrasound represents a quick, cost-effective, and reliable tool for lateral meniscal extrusion measurement. However, ultrasound-based measurements are not readily comparable to MRI-based measurements.

### **3 Publikationsverzeichnis**

#### **Veröffentlichung 1**

Winkler PW, Wierer G, Csapo R, Hepperger C, Heinzle B, Imhoff AB, Hoser C, Fink C. Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair. *Orthop J Sports Med.* 2020 Apr 10;8(4):2325967120914568. doi: 10.1177/2325967120914568. PMID: 32313812; PMCID: PMC7153201.

#### **Veröffentlichung 2**

Winkler PW, Csapo R, Wierer G, Hepperger C, Heinzle B, Imhoff AB, Hoser C, Fink C. Sonographic evaluation of lateral meniscal extrusion: implementation and validation. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021 Feb;141(2):271-281. doi: 10.1007/s00402-020-03683-1. Epub 2020 Nov 20. PMID: 33215303; PMCID: PMC7886729.

## 4 Einleitung

Die schnelle Entwicklung der Diagnostik und Therapie von Meniskuspathologien ist auf einen intensiven und stetigen Fortschritt in der medizinischen Wissenschaft zurückzuführen. Im Jahr 1884 wurden die Menisken noch als funktionslose Überreste intraartikulärer Beinmuskulatur betrachtet (Sutton, 1884). Demnach wurde den Menisken lange Zeit eine untergeordnete Rolle zugewiesen. Anatomische, biomechanische und klinische Forschungsergebnisse der vergangenen Jahrzehnte haben den unentbehrlichen Stellenwert des Innen- und Außenmeniskus für die natürliche Funktion des Kniegelenks mit qualitativ hochwertiger Evidenz untermauert (Becker et al., 2020). Durch die einzigartige strukturelle Zusammensetzung und Morphologie der Menisken tragen diese wesentlich zur tibiofemorale Lastübertragung, Stabilität, Ernährung, Lubrikation und Propriozeption des Kniegelenks bei (Masouros, McDermott, Amis, & Bull, 2008). Bereits 1986 konnte in einer wegweisenden Studie ein mittlerer Anstieg des tibiofemorale Kontaktdrucks um 236 % nach totaler medialer Meniscektomie im Vergleich zum nativen Zustand nachgewiesen werden (Baratz, Fu, & Mengato, 1986). Diese biomechanischen Ergebnisse können das klinisch beobachtete Auftreten und Fortschreiten einer Arthrose des Kniegelenks nach durchgeführter totaler Meniscektomie bedingen (Fairbank, 1948).

Um diesen sozioökonomisch ungünstigen Folgen entgegenzusteuern, konnte in den vergangenen Jahrzehnten eine Zunahme der Forschungsbemühungen zur Thematik des Meniskuserhalts verzeichnet werden. Klinisch äußert sich dies in einem Paradigmenwechsel von meniskusresezierender zu meniskuserhaltender Chirurgie. Dies konnte in einer rezenter Studie bestätigt werden, wobei eine Zunahme um 37 % an meniskuserhaltenden Eingriffen sowie eine Abnahme um 17 % an meniskusresezierenden Eingriffen zwischen 2004 und 2012 festgestellt wurde. Auch die Rate an meniskuserhaltenden Eingriffen in Kombination mit einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands (VKB) zeigte im gleichen Zeitraum eine Zunahme um 56 % (Parker, Hurwitz, Spang, Creighton, & Kamath, 2016).

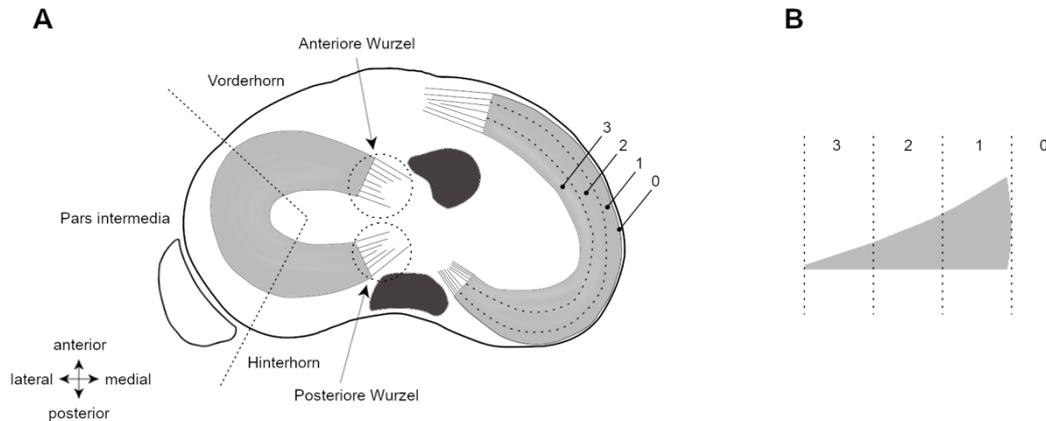
Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, die Relevanz und die Wirksamkeit des Meniskuserhalts bei Patient:innen mit kombinierter VKB-Ruptur und radiärer Außenmeniskusläsion zu untersuchen.

### **4.1 Anatomische Grundlagen**

Bei Menisken handelt es sich um sichelförmige, aus Faserknorpel bestehende intraartikuläre Strukturen mit dreiecksförmigem Querschnitt, die als Stoßdämpfer zwischen Femur und Tibia lokalisiert sind (Masouros et al., 2008). Der Innenmeniskus ist durch eine große anterior-posteriore Ausdehnung sowie eine relativ straffe Verbindung zur umliegenden Gelenkkapsel und zum medialen Kollateralband (MCL) gekennzeichnet (Fox, Wanivenhaus, Burge, Warren, & Rodeo, 2015; Śmigielski, Becker, Zdanowicz, & Cizek, 2015). Der Außenmeniskus hingegen ist charakterisiert durch eine geringere anterior-posteriore Ausdehnung sowie eine wesentlich höhere Mobilität im Vergleich zum Innenmeniskus (Fox et al., 2015).

Bei schichtweiser Betrachtung des Meniskusgewebes mittels Rasterelektronenmikroskopie konnte ein dreischichtiger Aufbau des Meniskusquerschnitts beobachtet werden (Petersen & Tillmann, 1998). Die oberflächliche und lamellare Schicht ist sowohl femoral als auch tibial aufzufinden und beinhaltet primär dünne Kollagenfibrillen. Hingegen befinden sich in der zentralen Hauptzone primär zirkumferentiell angeordnete Kollagenfaserbündel (Masouros et al., 2008; Petersen & Tillmann, 1998). Der komplexe mikrostrukturelle Aufbau ist für das anisotrope Verhalten und somit für die biomechanischen Materialeigenschaften der Menisken verantwortlich.

Aus anatomischer Sicht können Menisken, wie in Abbildung 1 ersichtlich, in fünf radiale (anteriore Wurzel, Vorderhorn, Pars intermedia, Hinterhorn, posteriore Wurzel) und vier zirkumferentielle (Zone 0 [peripher] bis Zone 3 [zentral]) Zonen gegliedert werden (Kopf et al., 2020).



**Abbildung 1: Zonengliederung der Menisken.** (A) Schematische Ansicht von proximal auf ein linkes Tibiaplateau mit aufliegenden Menisken. Darstellung der radialen und zirkumferentiellen Zonen. (B) Schematische Abbildung eines Meniskusquerschnitts mit Darstellung der zirkumferentiellen Zonen (Modifiziert nach (Winkler, Rothrauff, et al., 2020)).

Die Einteilung in vier zirkumferentielle Zonen lässt sich auf die Vaskularisation der Menisken zurückführen. In anatomischen Studien konnte veranschaulicht werden, dass die vaskuläre Versorgung der Menisken durch einen perimeniskalen Gefäßplexus sichergestellt wird (Arnoczky & Warren, 1982; Crawford et al., 2020). Dieser perimeniskale Gefäßplexus ist im Bereich der Gelenkkapsel lokalisiert und wird durch Äste der Aa. superior/inferior medialis/lateralis genus gebildet. Kapillaren dieses perimeniskalen Gefäßplexus penetrieren die periphere Meniskusbasis in radialer Orientierung und verlaufen als Endäste in Richtung Kniegelenkszentrum. Die maximale Eindringtiefe der penetrierenden Kapillaren ist von der radialen Meniskuszone abhängig und wurde mit 42 % der Breite des Innenmeniskus und 48 % der Breite des Außenmeniskus beschrieben (Arnoczky & Warren, 1982; Crawford et al., 2020).

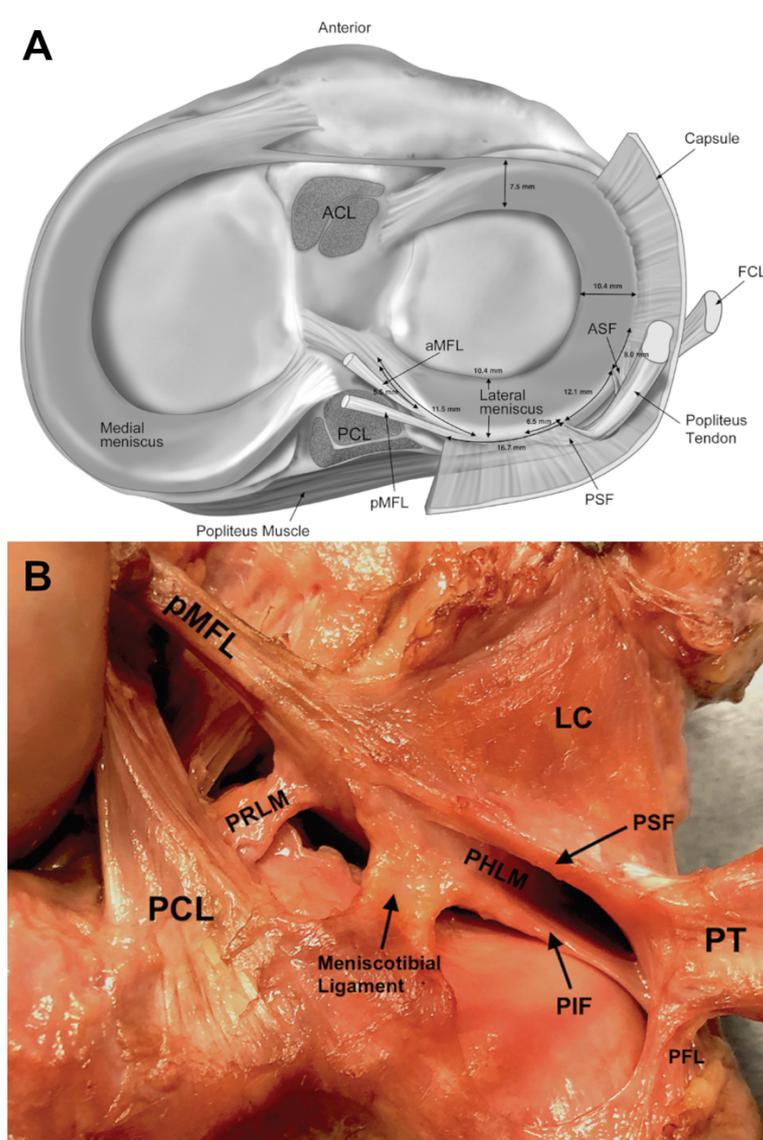
Genauere Kenntnisse über die Vaskularisation der Menisken sind insbesondere für die Entscheidungsfindung in der Therapie von Meniskusverletzungen von Bedeutung. Meniskusrisse, die ausschließlich in der zentralen Zone 3 (Synonym: weiß-weiße Zone) gelegen sind, haben aufgrund der eingeschränkten Durchblutungssituation ein geringeres Heilungspotenzial als Meniskusrisse der peripheren Zone 1 (Synonym: rot-rote Zone) (Kopf et al., 2020).

Der perimeniskale Ligamentkomplex bezeichnet sämtliche ligamentären Verbindungen der Menisken mit den umgebenden knöchernen und weichteiligen Strukturen und ist klinisch sowie biomechanisch von höchster Relevanz (Masouros et al., 2008). Die bereits genannten zirkumferentiellen Kollagenfaserbündel der zentralen Hauptzone der Menisken verbinden jeweils die anteriore und posteriore Meniskuswurzel, über die die Menisken straff mit dem subchondralen Knochen des Tibiaplateaus verbunden sind. Das Ligamentum coronarium oder auch meniskotibiales Ligament stellt eine weitere Verbindung der Meniskusbasis mit der proximalen Tibia dar und ist ebenso wie eine meniskokapsuläre Verbindung sowohl medial als auch lateral zu finden (Aman et al., 2019; Cavaignac et al., 2021). Das Ligamentum transversum genus (Synonym: anteriores intermeniskales Ligament) verbindet die Vorderhörner des Außen- und Innenmeniskus und ist laut anatomischen Studien in 50–94 % der Kniegelenkspräparate anzufinden (LaPrade et al., 2014; Nelson & LaPrade, 2000). In speziellen anatomischen Varianten der antero-medialen Meniskuswurzel wurde vermutet, dass das Ligamentum transversum genus zur primären Befestigung bzw. Stabilisierung des Innenmeniskusvorderhorns beiträgt. Gleichwohl bleibt die Funktion dieses Bands bislang weitgehend ungeklärt (Masouros et al., 2008; Nelson & LaPrade, 2000).

### **4.2 Spezielle Anatomie des Außenmeniskus**

Der Außenmeniskus weist im Vergleich zum Innenmeniskus einige Besonderheiten auf. Die antero-laterale Meniskuswurzel steht in enger Lagebeziehung zur tibialen Insertionszone des VKB. In einer anatomischen Studie konnte belegt werden, dass ein Großteil der Fasern der antero-lateralen Meniskuswurzel unterhalb der tibialen Insertionszone des VKB lokalisiert sind. Die dadurch entstehende Überlappung beträgt im Durchschnitt 63 % der antero-lateralen Wurzelinsertionszone und 41 % der tibialen Insertionszone des VKB (LaPrade et al., 2014). Das Zentrum der postero-lateralen Meniskuswurzel befindet sich durchschnittlich 10,1 mm posterior der antero-lateralen Meniskuswurzel und 12,7 mm anterior der tibialen Insertionszone des hinteren Kreuzbands (HKB) (Johannsen et al., 2012).

Als weitere Besonderheit des Außenmeniskus und mit hoher Relevanz für das vorliegende Forschungsprojekt ist die spezielle Anatomie des Außenmeniskushinterhorns (AM-HH) zu erläutern (Abbildung 2). Von der Ursprungszone des M. popliteus am lateralen Femur verläuft die Popliteussehne als intraartikuläre Struktur in Richtung medial und distal. Im Bereich des AM-HH zieht die Popliteussehne durch einen fibrösen Kanal, der als Hiatus popliteus bezeichnet wird, bevor sie nach extraartikulär übertritt und als breiter Muskel an der Rückfläche der proximalen Tibia inseriert.



**Abbildung 2: Spezielle Anatomie des Außenmeniskus.** (A) Schematische Ansicht von proximal auf ein rechtes Tibiaplateau mit Darstellung des Hiatus

*popliteus und der meniskofemorale Ligamente sowie deren Lagebeziehung. (B) Anatomische Abbildung der posterolateralen Kniegelenksstrukturen eines rechten Kniegelenks. Anteriores meniskofemorales Ligament (aMFL); anterosuperiorer popliteomeniskaler Faszikel (ASF); Außenmeniskushinterhorn (PHLM); hinteres Kreuzband (PCL); LC, laterale Kniegelenkskapsel (LC); laterales Kollateralband (FCL); popliteofibulares Ligament (PFL); Popliteussehne (PT); posteriores meniskofemorales Ligament (pMFL); posteroinferiorer popliteomeniskaler Faszikel (PIF); posterolaterale Meniskuswurzel (PRLM); posterosuperiorer popliteomeniskaler Faszikel (PSF); vorderes Kreuzband (ACL); Bilder aus (Aman et al., 2019).*

Der Hiatus popliteus wird durch die Gelenkkapsel und durch drei popliteomeniskale Faszikel gebildet und repräsentiert eine natürliche Unterbrechung der meniskosynovialen Verbindung des Außenmeniskus (Grassi et al., 2021). Basierend auf der vaskulären Versorgungsarchitektur des Außenmeniskus führt diese natürliche Unterbrechung zu einer vaskulären Minderversorgung des Außenmeniskus im Bereich des Hiatus popliteus (Arnoczky & Warren, 1982; Crawford et al., 2020). Diese Minderversorgung konnte mit schlechteren Heilungsraten von Meniskusnähten in diesem Bereich assoziiert werden, was die klinische Relevanz unterstreicht (Ouanezar et al., 2018).

Ein weiteres Kennzeichen des Außenmeniskus sind die meniskofemorale Ligamente (MFL), die das AM-HH mit der lateralen Facette der medialen Femurkondyle verbinden. In Abhängigkeit der Lagebeziehung zum HKB wird ein anteriores MFL (= Humphrey-Ligament) von einem posterioren MFL (= Wrisberg-Ligament) abgegrenzt (Aman et al., 2019). In Studien konnte gezeigt werden, dass mindestens ein MFL in 90 % der Patient:innen anzutreffen ist, wobei sich das Humphrey-Ligament auf 20–75 % und das Wrisberg-Ligament auf 70–100 % der Fälle beläuft (Winkler, Zsidai, et al., 2021). Während die femoralen Insertionszonen der MFL bereits ausgiebig untersucht wurden, herrscht über die meniskale Insertionszone noch weitgehend Unklarheit. In einer rezenten anatomischen Studie konnte eine mittlere Distanz zwischen dem Zentrum der postero-lateralen Meniskuswurzel und meniskaler Insertionszone des anterioren

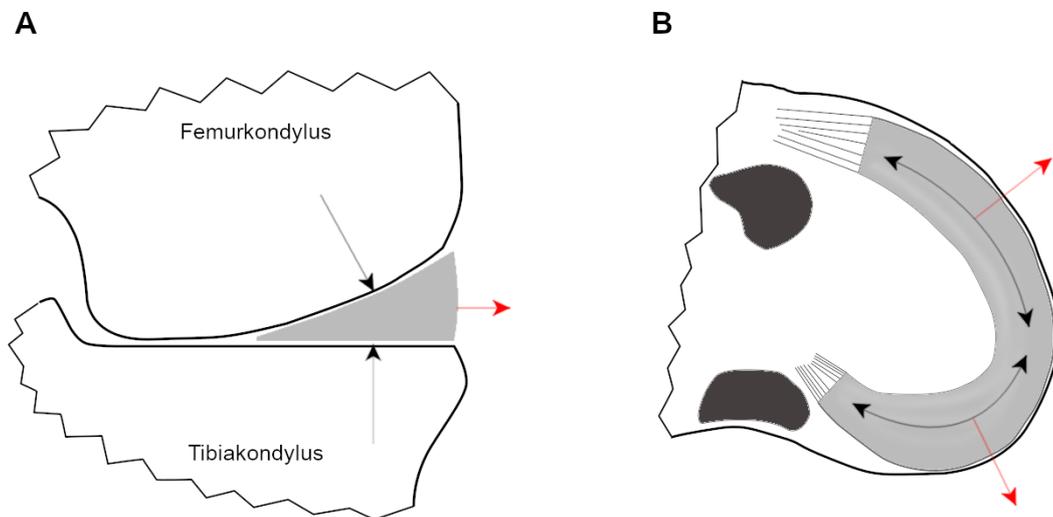
bzw. posterioren MFL von 5,5 mm bzw. 11,5 mm nachgewiesen werden (Aman et al., 2019).

### 4.3 Biomechanische Grundlagen

Die tibiofemorale Lastübertragung stellt eine der Hauptfunktionen der Menisken dar. Angesichts der knöchernen Morphologie des distalen Femurs und der proximalen Tibia verkörpert die tibiofemorale Artikulation ein inkongruentes Gelenk. Durch die Interposition des Innen- und Außenmeniskus zwischen Femur und Tibia sowie deren komplexen knöchernen und weichteiligen Anheftung ergibt sich eine sogenannte dynamische Gelenkpfanne, die die bestehende Inkongruenz zumindest teilweise ausgleichen kann (Jagodzinski, Müller, & Friederich, 2016). Folge der erhöhten Gelenkkongruenz sind eine Zunahme der lastübertragenden Fläche und eine damit verbundene Abnahme des tibiofemorale Kontakt drucks unter axialer Belastung. In biomechanischen Untersuchungen konnte belegt werden, dass abhängig vom Belastungszustand und Flexionsgrad des Kniegelenks 44–78 % des entsprechenden tibiofemorale Kompartiment drucks vom Innenmeniskus und 70–81 % vom Außenmeniskus übertragen werden (Fox, Bedi, & Rodeo, 2012; Seedhom & Hargreaves, 1979; Walker et al., 2015). Dies ermöglicht eine Protektion des tibialen und femoralen Gelenkknorpels, wodurch der frühzeitigen Entstehung bzw. Progression einer Kniegelenksarthrose vorgebeugt wird.

Voraussetzung zur suffizienten tibiofemorale Lastübertragung und -verteilung durch die Menisken ist ein funktionell intaktes Ringsystem. Der Meniskusring wird durch die Verbindung der anterioren und posterioren Meniskuswurzel über die in der zentralen Hauptzone verlaufenden, zirkumferentiell angeordneten Kollagenfaserbündel gebildet. Bei axialer Lastaufbringung bedingt der dreiecksförmige Meniskusquerschnitt die Erzeugung eines radiären Kraftvektors. Dieser radiäre Kraftvektor hat das Bestreben, den entsprechenden Meniskus aus dem Gelenkspalt zu verdrängen, was folglich als Meniskusextrusion bezeichnet wird. Bei intaktem Ringsystem kann eine pathologische Meniskusextrusion verhindert werden, indem die axiale tibiofemorale Kraftkomponente in eine

zirkumferentielle Umfangsspannung umgewandelt wird (Abbildung 3) (Fox et al., 2012; Masouros et al., 2008).



**Abbildung 3: Umfangsspannung.** (A) Schematischer koronarer Ausschnitt eines Kniegelenks auf Höhe des Gelenkspalts. (B) Schematischer axialer Ausschnitt eines linken Tibiaplateaus mit Ansicht von proximal und aufliegendem Innenmeniskus. Femoraler und tibialer Kraftvektor (schwarze Pfeile); Radiärer Kraftvektor (rote Pfeile); zirkumferentielle Umfangsspannung (schwarze Doppelpfeile).

Eine Unterbrechung des Meniskusrings kann durch eine Meniskuswurzelläsion oder einen vollständigen Radiärriss bedingt sein. Jede Unterbrechung des Ringsystems führt in weiterer Folge zu einer pathologischen Meniskusextrusion mit konsekutiv gesteigertem tibiofemoralem Kontaktdruck (Karpinski et al., 2019; Willinger et al., 2020). In einer biomechanischen Studie wurde eine Zunahme des tibiofemoralem Kontaktdrucks des lateralen Kompartiments um durchschnittlich 49 % unter 800-N-axialer Last nach Erzeugung eines vollständigen Radiärrisses des AM-HH im Vergleich zum nativen Zustand nachgewiesen (Ode et al., 2012). Diese Zunahme war vergleichbar mit dem Zustand nach kompletter Entfernung des Außenmeniskus, weshalb im Falle eines vollständigen Radiärrisses häufig auch von einer funktionellen Meniskektomie gesprochen wird. Auffällig war, dass die tibiofemorale Kontaktmechanik des nativen Zustands nach durchgeführter

Naht des Radiärrisses des AM-HH nahezu wiederhergestellt werden konnte, was als biomechanische Grundlage für das vorliegende Forschungsprojekt dient (Ode et al., 2012).

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, sind die MFL als Besonderheit des Außenmeniskus zu werten, was sich ebenfalls bei biomechanischer Betrachtung bestätigt. Postero-laterale Meniskuswurzelläsionen bzw. wurzelnahe Radiärrisse können in Abhängigkeit von der Lage der Läsion und vom Zustand der MFL in drei verschiedene Typen unterteilt werden (Forkel et al., 2015). Typ-I (Wurzelavulsion)- und Typ-II (wurzelnahe Radiärriss)-Verletzungen sind durch eine vollständige Meniskuswurzelläsion bei intakten MFL charakterisiert. Bei Typ-III-Verletzungen zeigt sich zusätzlich eine vollständige Unterbrechung der MFL. Biomechanisch konnte nach Erzeugung von Typ-I- und Typ-II-Meniskuswurzelläsionen kein Unterschied hinsichtlich des tibiofemorale Kontaktendrucks im Vergleich zum nativen Zustand beobachtet werden. Die zusätzliche Durchtrennung der MFL und damit Erzeugung einer Typ-III-Verletzung führte letztendlich zu einer statistisch signifikanten Erhöhung des Kontaktendrucks im lateralen Kompartiment (Forkel et al., 2013). Daraus lässt sich der stabilisierende Effekt der MFL im Fall einer Typ-I- oder Typ-II-Verletzung ableiten. Die im vorliegenden Forschungsprojekt untersuchten Radiärrisse des AM-HH befanden sich stets im Bereich des Hiatus popliteus und demnach außerhalb des stabilisierenden Effekts der MFL.

Im nativen Kniegelenk fungiert das VKB als primärer Stabilisator gegen die anteriore tibiale Translation sowie die tibiale Innen- und Außenrotation (Butler, Noyes, & Grood, 1980). Im Fall einer VKB-Ruptur wird diese Funktion von den sekundären Stabilisatoren – dem Innen- und Außenmeniskus – übernommen. In biomechanischen Studien ließ sich bestätigen, dass der Innenmeniskus im VKB-insuffizienten Kniegelenk als Hauptstabilisator gegen die anteriore tibiale Translation sowie die tibiale Außenrotation dient (Musahl et al., 2010; Stephen et al., 2016). Dem Außenmeniskus wurde hingegen eine wesentliche Rolle in der Aufrechterhaltung der Rotationsstabilität des Kniegelenks zugeschrieben (Musahl et al., 2010). In einer Studie konnte im VKB-rekonstruierten Kniegelenk eine Zunahme der tibialen Translation im Zuge eines simulierten Pivot-Shift-

Tests nach Erzeugung einer vollständigen postero-lateralen Wurzelläsion beobachtet werden, die nach Wurzelrefixation signifikant abnahm (Tang et al., 2019).

#### **4.4 Klinische Relevanz des Außenmeniskusverlusts**

Bei Patient:innen, die sich einer VKB-Rekonstruktion unterzogen, wurde eine Prävalenz von 36–40 % für mediale und von 30–46 % für laterale Meniskusverletzungen beobachtet (Borchers et al., 2011; Brambilla et al., 2015; Fetzer et al., 2009). Der Anteil an Radiärrissen unter Außenmeniskusrissen im Zuge einer VKB-Rekonstruktion wurde mit 12–29 % beziffert (Fetzer et al., 2009; Kawashima et al., 2020). Der hohe Prozentsatz an kombinierten VKB- und Außenmeniskusverletzungen lässt sich am ehesten auf den typischen Verletzungsmechanismus im Zuge einer VKB-Ruptur zurückführen. In frühen Beugegraden bewirkt unter vorliegendem Valgusstress ein sogenannter Pivoting-Mechanismus eine anteriore Subluxation des lateralen Tibiaplateaus in Relation zum Femur. Der beschriebene Pivoting-Mechanismus bewirkt durch eine Kombination aus axialem Druck, anteriorer tibialer Translation, Valgusrotation und tibialer Innenrotation nach initialer Ruptur des VKB eine Maximalbelastung des Außenmeniskus (Koga et al., 2010).

Die bereits im Detail erläuterte Unterbrechung der Ringstruktur im Zuge eines vollständigen radiären Außenmeniskusrisses bedingt eine Situation vergleichbar mit einer totalen lateralen Meniskektomie. Die Folgen eines lateralen Meniskusverlusts wurden bereits in zahlreichen klinischen Untersuchungen beschrieben (McDermott & Amis, 2006). In einer retrospektiven Verlaufsuntersuchung mindestens 30 Jahre nach totaler Meniskektomie (n = 63) zeigten 77 % der Patient:innen Arthrosezeichen und 22 % waren mit dem Zustand des Kniegelenks unzufrieden (McNicholas et al., 2000). Durch die Weiterentwicklung der Arthroskopie ist die Meniskusteilresektion als Therapieoption immer populärer geworden. Anhand von 31 im Langzeitverlauf untersuchten Kniegelenken (durchschnittliches Follow-up, 10,3 Jahre) nach durchgeführter partieller lateraler Meniskektomie wurde in 41 % der Patient:innen eine hochgradige Gonarthrose (Grad 3/4) festgestellt. In nur 3 % der

untersuchten Patient:innen konnten keine degenerativen Anzeichen verzeichnet werden. Zusätzlich lag die Rate an Reoperationen aufgrund einer persistierenden Beschwerdesymptomatik des lateralen Kompartiments bei 29 % (Hoser et al., 2001). In einer weiteren Untersuchung konnte in nahezu 38 % der Patient:innen, die sich einer partiellen lateralen Meniskektomie unterzogen, nach mindestens zehn Jahren Follow-up eine signifikante Gelenkspaltverschmälerung beobachtet werden (Chatain, Adeleine, Chambat, & Neyret, 2003).

Der Verlust von Außenmeniskusgewebe wird häufig mit der Gefahr des Karriereendes bei professionellen Athlet:innen in Verbindung gebracht. Anhand professioneller Football-Spieler der National Football League (NFL) konnte gezeigt werden, dass nach durchgeführter partieller lateraler Meniskektomie (n = 77) in 39 % der Fälle das ursprüngliche sportliche Niveau (Teilnahme an einem regulären NFL-Spiel) nicht mehr erreicht werden konnte (Aune, Andrews, Dugas, & Cain, 2014). Zusätzlich konnte bei professionellen Fußballspielern veranschaulicht werden, dass die Zeit zur Rückkehr zum Sport (sieben Wochen vs. fünf Wochen) sowie die Rate an unerwünschten postoperativen Ereignissen (69 % vs. 8 %) nach lateraler im Vergleich zu medialer Meniskektomie signifikant höher waren (Nawabi, Cro, Hamid, & Williams, 2014). Diese Beobachtungen könnten auf die bereits nach partieller lateraler Meniskektomie (1/3 der Meniskusbreite) biomechanisch nachgewiesene statistisch signifikante Veränderung der Kniegelenkskinematik zurückzuführen sein (Novaretti et al., 2020).

Häufig werden eine kürzere Operationsdauer, schnellere Rehabilitationsphase und im kurzfristigen Follow-up eine geringere Rate an Reoperationen als Argumente für eine Meniskusteilresektion in einer sportlich aktiven Population herangezogen (Paxton, Stock, & Brophy, 2011). Bei Betrachtung der Langzeitergebnisse konnte indes in einer systematischen Übersichtsarbeit belegt werden, dass die Meniskusnaht der Meniskusteilresektion sowohl in funktionellen (Lysholm-Score) als auch radiologischen Ergebnissen überlegen ist. Ausbleibende degenerative Veränderungen konnten bei 78 % der Patient:innen nach Meniskusnaht und bei lediglich 64 % der Patient:innen nach Meniskusteilresektion beobachtet werden (Paxton et al., 2011).

Versagensraten von bis zu 24 % werden häufig als Argument gegen die Durchführung von Meniskusnähten angeführt (Nepple, Dunn, & Wright, 2012). Diesbezüglich sei allerdings angemerkt, dass Versagens- und Reoperationsraten nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und Meniskusnaht signifikant geringer ausfallen im Vergleich zu isolierten Meniskusnähten (Paxton et al., 2011; Ronnblad, Barenius, Engstrom, & Eriksson, 2020). Zusätzlich konnte eine signifikant niedrigere Versagensrate für laterale im Vergleich zu medialen Meniskusnähten beobachtet werden (Ronnblad et al., 2020).

In Hinblick auf klinische Ergebnisse wurden statistisch signifikante Verbesserungen in Patient-Reported Outcome Scores nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und sowohl medialer als auch lateraler Meniskusnaht nachgewiesen (Westermann, Wright, Spindler, Huston, & Wolf, 2014). In einer Studie konnten nach sechs Jahren Follow-up signifikante Anstiege im Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) und International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form (IKDC-SKF) festgestellt werden (Westermann et al., 2014). In einer weiteren Studie wurde bei 30 Patient:innen, die sich einer kombinierten VKB-Rekonstruktion und Naht eines Lappen- oder Radiärrisses des AM-HH unterzogen, nach mindestens zwei Jahren Follow-up eine Second-Look-Arthroskopie durchgeführt. Bei 18 (60 %) Patient:innen konnte eine komplette Heilung und bei neun (30 %) Patient:innen eine partielle Heilung nachgewiesen werden (Tsuji et al., 2019). Diese Ergebnisse unterstreichen den Stellenwert des Meniskuserhalts im Falle einer kombinierten VKB-Ruptur und Außenmeniskusläsion.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass die Kombination aus VKB-Ruptur und Radiärriss des AM-HH in einer jungen, sportlich aktiven Population ein häufig anzutreffendes Verletzungsmuster ist. Aufgrund einer Unterbrechung der Ringstruktur führt ein Radiärriss zu einem vollständigen Funktionsverlust des Außenmeniskus. Klinisch äußert sich dies in einer rasch entstehenden bzw. progredienten Kniegelenksarthrose. Ursächlich hierfür sind eine insuffiziente Lastübertragung sowie eine Rotationsinstabilität des lateralen Kniegelenkskompartiments. Trotz schneller und kostengünstiger Verfügbarkeit

sowie der Möglichkeit einer dynamischen Untersuchung wird der Ultraschalluntersuchung des Außenmeniskus nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Aktueller Goldstandard in der Diagnostik und Evaluation von Außenmeniskusverletzungen ist die Magnetresonanztomografie (MRT).

## 5 Fragestellung und Hypothesen

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde das Ziel verfolgt, die dynamische Außenmeniskusextrusion nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH quantitativ mittels MRT zu bestimmen. Ein weiteres Ziel des Forschungsprojekts bestand in der Implementierung, Reliabilitäts- und Validitätsprüfung eines standardisierten Untersuchungsprotokolls zur Ultraschall-basierten Quantifizierung der dynamischen Außenmeniskusextrusion.

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

- (1) Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH führt zu einer Reduktion der absoluten Außenmeniskusextrusion.
- (2) Die Außenmeniskusextrusion nimmt nach axialer Lastaufbringung zu.
- (3) Das operativ versorgte Kniegelenk weist eine größere absolute Außenmeniskusextrusion bei gleichbleibendem dynamischem Verhalten im Vergleich zum gesunden Kniegelenk der Gegenseite auf.
- (4) Die Anwendung eines standardisierten Untersuchungsprotokolls lässt eine zuverlässige und valide Ultraschall-basierte Bestimmung der Außenmeniskusextrusion zu.

## 6 Material und Methoden

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde entsprechend der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Die Genehmigung der Durchführung des Forschungsprojekts wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Innsbruck erteilt (Nr. 1251/2017). Eine mündliche und schriftliche Einverständniserklärung zur Teilnahme am Forschungsprojekt wurde von sämtlichen Patient:innen und Proband:innen erhoben.

### 6.1 Patient:innenrekrutierung

#### 6.1.1 Veröffentlichung 1

Patient:innen, die sich zwischen 2010 und 2017 einer einzeitigen, kombinierten VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH unterzogen, wurden aus der Datenbank der Praxis *Gelenkpunkt – Sport und Gelenkchirurgie Innsbruck* ermittelt. Einschlusskriterien: Alter zum Zeitpunkt der Operation: 18–40 Jahre; primäre VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines arthroskopisch bestätigten instabilen Radiärrisses des AM-HH; mindestens zwölf Monate Follow-up; neutrale Beinachse basierend auf klinischer Untersuchung (Hinman, May, & Crossley, 2006; Navali, Bahari, & Nazari, 2012); Body-Mass-Index < 30 kg/m<sup>2</sup>. Folgende Kriterien führten zum Ausschluss aus dem Forschungsprojekt: Revisionsoperation; Längs-, Horizontal-, Komplex- oder Wurzelriss des Außenmeniskus; durchgeführte partielle Menispektomie des Außenmeniskus; Radiärriss des Außenmeniskus limitiert auf Zone 3 nach Arnoczky und Warren (Arnoczky & Warren, 1982); Vorgeschichte einer kontralateralen VKB-, Außenmeniskus- oder komplexen Knieverletzung. Zur Abgrenzung von posterolateralen Meniskuswurzelverletzungen und insbesondere von Typ-I- und Typ-II-Verletzungen nach Forkel et al. (Forkel et al., 2015) wurden ausschließlich Patient:innen mit arthroskopisch bestätigten Radiärrissen im Bereich des Hiatus popliteus und somit lateral der meniskalen Insertionszone der MFL eingeschlossen. Dadurch konnte eine Beeinflussung des stabilisierenden Effekts der MFL auf die prä- und postoperative Außenmeniskusextrusion ausgeschlossen werden.

### 6.1.2 Veröffentlichung 2

Zur Implementierung, Reliabilitäts- und Validitätsprüfung eines standardisierten Untersuchungsprotokolls zur Ultraschall-basierten Quantifizierung der dynamischen Außenmeniskusextrusion wurden zwischen 2018 und 2019 zusätzlich freiwillige Proband:innen eingeladen. Zur Erzeugung eines homogenen Patient:innenkollektivs wurden folgende Einschlusskriterien angewendet: Alter zum Zeitpunkt der Untersuchung: 18–45 Jahre; unauffälliger klinischer Befund beider Kniegelenke; neutrale Beinachse basierend auf klinischer Untersuchung (Hinman et al., 2006; Navali et al., 2012); Body-Mass-Index < 30 kg/m<sup>2</sup>. Jegliche Vorgeschichte einer Kniegelenksverletzung sowie klinische Anzeichen einer bestehenden Gonarthrose (Altman et al., 1986; Parsons et al., 2018) führten zum Ausschluss aus dem Forschungsprojekt.

Nach postalischer Einladung der Patient:innen und Proband:innen erfolgten ein ausführliches Aufklärungsgespräch hinsichtlich der Durchführung des Forschungsprojekts, eine Anamneseerhebung, Erhebung validierter Patient-Reported Outcomes (PRO), klinische Untersuchung, Ultraschalluntersuchung (Veröffentlichung 1 und 2) und Anfertigung von MRT-Aufnahmen (Veröffentlichung 1) im Zuge eines einmaligen Besuchs in der *Privatklinik Hochrum – Sanatorium der Kreuzschwestern*.

## 6.2 Operationstechnik (Veröffentlichung 1)

Eingeschlossene Patient:innen unterzogen sich einer primären anatomischen VKB-Rekonstruktion in Einzelbündeltechnik. Als autologe Sehnen transplantate kamen je nach Entscheidung des Chirurgen ipsilaterale Hamstring-, Quadrizeps- und Patellasehnen transplantate zur Anwendung. Die Anlage des femoralen Bohrkanals erfolgte in anteromedialer Portaltechnik. Die femorale Transplantatfixation fand mittels extrakortikaler Flipp-Button-Fixierung statt. Tibial wurde eine Interferenzschraubenfixation mit einer Back-up-Fixierung durch Verknoten der Auszugsfäden über einer kortikalen Knochenbrücke kombiniert (Fink et al., 2018). Zur zeitgleichen Versorgung des Radiärisses im AM-HH wurde eine All-inside-Nahttechnik vorgenommen, wobei je nach Rissgröße ein

bis drei Nähte zur Anwendung kamen (ULTRA FAST-FIX, Smith & Nephew, London, GBR).

### **6.3 Datenerhebung**

Die Datenerhebung (Veröffentlichung 1 und 2) erfolgte im Zuge einer einmaligen Verlaufsuntersuchung zwischen Mai 2018 und Dezember 2019.

#### 6.3.1 Anamneseerhebung

Nach ausführlicher Aufklärung über das Forschungsvorhaben und Erhalt der schriftlichen sowie mündlichen Einverständniserklärung wurde eine detaillierte Anamneseerhebung durchgeführt. Hierbei wurden soziodemografische Daten wie Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index, Raucheranamnese sowie Bildungs- und Arbeitsstatus erhoben. Im Zuge der sportspezifischen Anamnese wurden die jeweiligen prä- und postoperativen Hauptsportarten, das jeweils ausgeübte Niveau (Anfänger, fortgeschritten, Experte, Profi) und die zugehörige sportliche Aktivität in Tagen und Stunden pro Woche erfasst. Verletzungs- und operationsspezifische Daten (Veröffentlichung 1) umfassten das Datum der Verletzung, Verletzungsmechanismus, frühere Verletzungen und Operationen, das Datum der Operation sowie postoperative Komplikationen und Reoperationen.

#### 6.3.2 Patient-Reported Outcomes (PROs)

Zur Erfassung der subjektiven Einschätzung der Kniegelenksfunktion durch die Patient:innen (Veröffentlichung 1) wurden standardisierte und validierte PROs mithilfe eines Fragebogens erhoben (Anhang 16.3). Folgende PROs kamen zur Anwendung: International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form (IKDC-SKF); Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS); Lysholm Score; Tegner Aktivitätslevel; visuelle Analogskala (VAS) für Schmerz.

Der IKDC-SKF wurde zur Beurteilung diverser Kniegelenkspathologien einschließlich Band- und Meniskusverletzungen entwickelt und umfasst Fragen zur vorliegenden Symptomatik (sieben Fragen), Funktion (zwei Fragen) sowie Sport- und Alltagsaktivität (zehn Fragen) des betroffenen Kniegelenks (Irrgang et

al., 2001). Der KOOS wurde entwickelt, um neben den bereits etablierten Scores zur Beurteilung der Gonarthrose auch jüngere und sportlich aktive Patient:innen mit Band- und Meniskusverletzungen zu evaluieren. Anhand der fünf Subskalen (Schmerz, neun Fragen; Symptome, sieben Fragen; Tätigkeiten des Alltags [ADL], 17 Fragen; Funktionsfähigkeit im Sport und in der Freizeit [Sports/Rec], fünf Fragen; Lebensqualität im Zusammenhang mit dem betroffenen Kniegelenk [QOL], vier Fragen) des KOOS besteht die Möglichkeit, auch langfristige Auswirkungen von Verletzungen, etwa die häufig entstehende posttraumatische Arthrose, zu beurteilen (Roos, Roos, Lohmander, Ekdhahl, & Beynnon, 1998). Der Lysholm-Score setzt sich aus acht Fragen zusammen und wurde zur subjektiven Selbsteinschätzung von Patient:innen mit VKB-Ruptur oder auch anderen Kniegelenksverletzungen mit speziellem Fokus auf Instabilitätssymptomatik entwickelt (Briggs et al., 2009). Anhand des Tegner Aktivitätslevels kann das Aktivitätsniveau von Patient:innen nach Kniegelenksverletzung mithilfe einer Skala mit elf unterschiedlichen Aktivitätsgraden beurteilt werden. Die Aktivitätslevels reichen von einer durch die Kniesymptomatik bedingten Arbeitsunfähigkeit bis hin zu internationalem Leistungssport (Briggs et al., 2009). Letztlich wurde die VAS für Schmerz herangezogen, um nochmals spezifisch die Schmerzsymptomatik des betroffenen Kniegelenks bewerten zu können.

### 6.3.3 Klinische Untersuchung

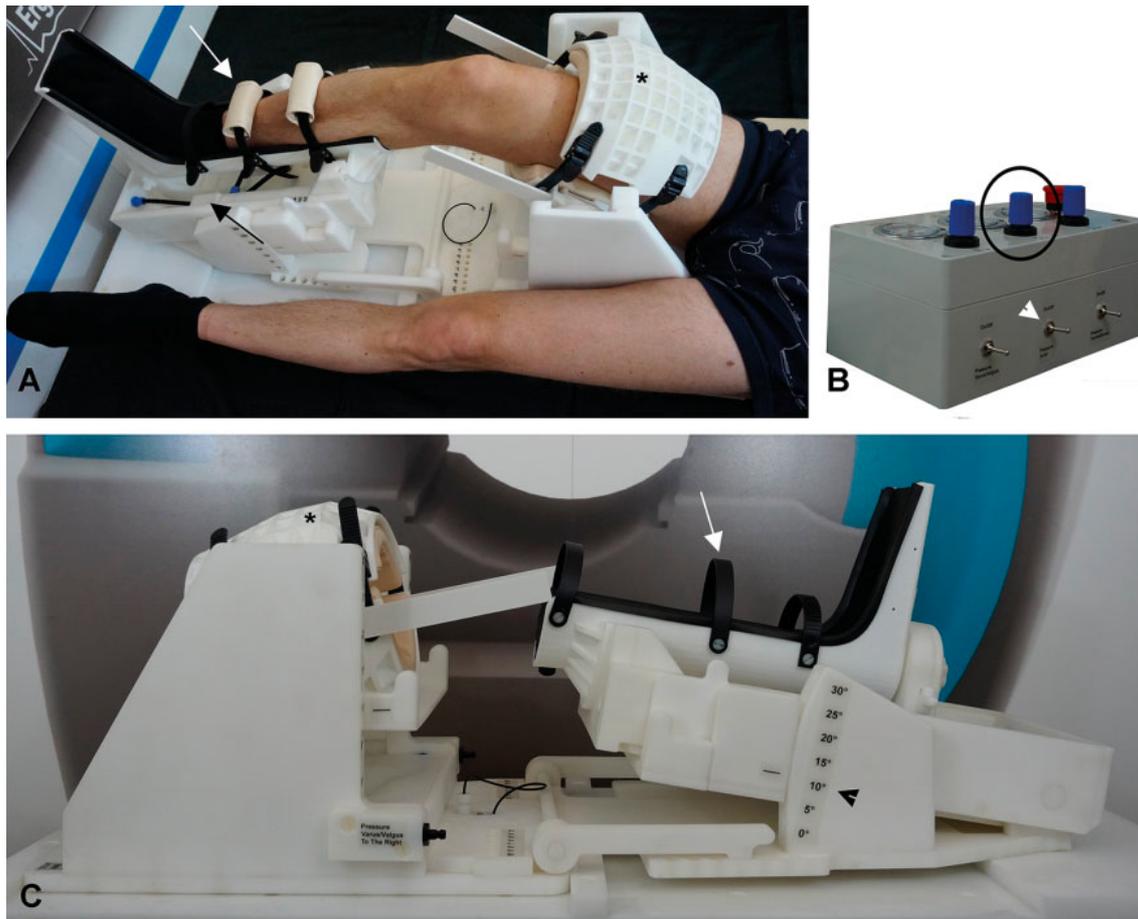
An beiden Kniegelenken sämtlicher Teilnehmer:innen des Forschungsprojekts (Veröffentlichung 1 und 2) wurde eine standardisierte klinische Untersuchung basierend auf dem Formblatt zur Untersuchung des Kniegelenks des International Knee Documentation Committee durchgeführt (Anhang 16.4) (Hefti, Müller, Jakob, & Stäubli, 1993). Hierbei folgte einer orientierenden Untersuchung der allgemeinen Gelenklaxizität und Patellastellung eine Überprüfung des aktiven und passiven Bewegungsumfangs. Darauf schloss sich eine ausgiebige Testung des Kapselbandapparats mit spezifischen Tests zur Untersuchung des VKB, HKB, MCL und lateralen Kollateralbands (LCL) an. Zur spezifischen Untersuchung der Menisken wurden folgende Tests angewandt: Palpation des Gelenkspalts, Steinmann-Tests, McMurray-Test und Thessaly-Test (Blyth et al., 2015). Im nächsten Schritt wurden die Stabilität und das Alignment des Patellofemoralgelenks überprüft und auf etwaige Anzeichen für

Knorpelschädigungen geachtet. Anschließend erfolgte eine klinische Beurteilung der Beinachse anhand einer Messlehre und eines Goniometers (Hinman et al., 2006; Navali et al., 2012), um unnötige Strahlenbelastung durch eine Ganzbeinröntgenaufnahme zu vermeiden. Abschließend wurde zur funktionellen Beurteilung der Single-Leg-Hop-Test durchgeführt.

### 6.3.4 Magnetresonanztomografie (MRT)

Im Zuge der Nachuntersuchung wurde bei Patient:innen, die sich einer kombinierten VKB-Rekonstruktion und Naht eines Radiärrisses des AM-HH unterzogen, eine MRT (MAGNETOM Skyra 3.0-T MRT, Siemens Healthineers, Erlangen, DEU) beider Kniegelenke angefertigt. Koronare, sagittale und axiale Protonendichte-gewichtete, Turbo-Spin-Echo-Sequenzen mit Fettunterdrückung wurden entsprechend folgendem Protokoll aufgenommen: koronar, Repetitionszeit/Echozeit (TR/TE) = 4330/30 ms, Bildfeld (FOV) = 130 x 130 mm, Schichtdicke = 2 mm; sagittal, TR/TE = 2610/30 ms, FOV = 130 x 130 mm, Schichtdicke = 2 mm; axial, TR/TE = 1950/29 ms, FOV = 150 x 150 mm, Schichtdicke = 2 mm.

Zur standardisierten Kniegelenkslagerung (10° Flexion, 0° tibiale Rotation) sowie zur axialen Lastaufbringung wurde eine speziell angefertigte MRT-taugliche pneumatische Lagerungsschiene (Ergospect, Innsbruck, AUT) verwendet (Abbildung 4). Mithilfe eines pneumatischen Systems innerhalb der Knieschiene konnten MRT-Aufnahmen in einem unbelasteten und belasteten Zustand angefertigt werden. Für den belasteten Zustand wurde eine axiale Kraft entsprechend 50 % des patientenindividuellen Körpergewichts aufgebracht, um einen physiologischen beidbeinigen Stand zu simulieren. Die Reihenfolge der MRT-Untersuchung war wie folgt: gesundes kontralaterales Kniegelenk unbelastet, gesundes kontralaterales Kniegelenk belastet, operativ versorgtes Kniegelenk unbelastet, operativ versorgtes Kniegelenk belastet.



**Abbildung 4: Pneumatische Lagerungsschiene.** (A) Kniegelenk in standardisierter Lagerung ( $10^\circ$  Flexion,  $0^\circ$  tibiale Rotation). (B) Steuerpult zur stufenlosen axialen Lastapplikation. (C) Seitliche Ansicht der Lagerungsschiene. Druckregulator (schwarzer Kreis); Ein-/Aus-Schalter des pneumatischen Systems (weiße Pfeilspitze); femorale Fixationsvorrichtung (Stern); Flexionsskala (schwarze Pfeilspitze); Pneumatikzylinder (schwarzer Pfeil); tibiale Fixationsvorrichtung (weißer Pfeil); Bild aus (Winkler, Wierer, et al., 2020).

#### 6.3.5 Ultraschall

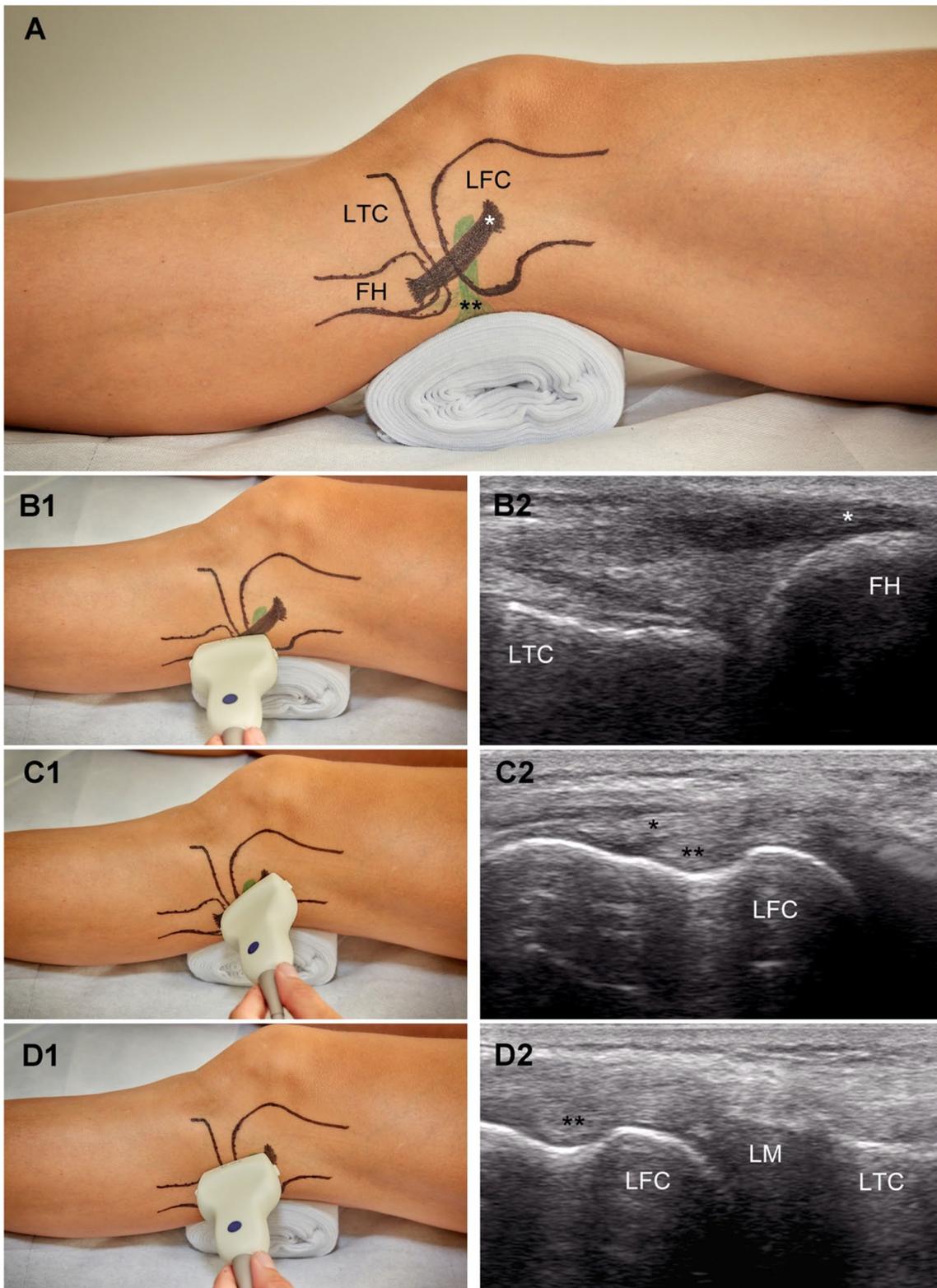
Zur Ultraschall-basierten Bestimmung der Außenmeniskusextrusion wurde ein 5–10-MHz-Linearschallkopf mit dem Ultraschallgerät Sonosite® MicroMaxx® (SonoSite, Inc., Bothell, WA, USA) verwendet.

Beide Kniegelenke der eingeschlossenen Patient:innen sowie der freiwilligen Proband:innen wurden in einem unbelasteten und belasteten Zustand untersucht. Für den unbelasteten Zustand wurden die Teilnehmer:innen in

Rückenlage auf einer Untersuchungsliege platziert. Im belasteten Zustand wurden die Teilnehmer:innen in einem beidbeinigen Stand mit gleichmäßiger Gewichtsverteilung und leichter Hocke positioniert. Auf diese Weise konnte eine axiale Lastaufbringung entsprechend 50 % des patientenindividuellen Körpergewichts erreicht werden. Sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand wurde auf eine reproduzierbare Stellung des Kniegelenks in 10° Flexion und 0° tibialer Rotation geachtet. Entsprechend den MRT-Aufnahmen wurden die Ultraschallaufnahmen zunächst im unbelasteten und anschließend im belasteten Zustand angefertigt. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Schallkopfpositionierung wurde die zur Messung der Außenmeniskusextrusion bestimmte Schallkopfposition im unbelasteten Zustand an der Haut markiert. Ultraschallaufnahmen im unbelasteten Zustand wurden von zwei Untersuchenden zweimal und unabhängig voneinander angefertigt. Ultraschallaufnahmen im belasteten Zustand wurden von den gleichen zwei Untersuchenden einmal sowie unabhängig voneinander angefertigt.

Im Zuge vorausgehender Testungen wurde folgendes Ultraschallprotokoll basierend auf anatomischen Landmarken erstellt, um eine zuverlässige Bestimmung der Außenmeniskusextrusion zu gewährleisten (Abbildung 5):

- (1) Identifizierung des Fibulaköpfchens und der fibularen Insertionszone des LCL im longitudinalen Schnitt
- (2) Verfolgen des LCL in Richtung proximal und Darstellung der femoralen Insertionszone des LCL
- (3) Schwenken des Schallkopfs und Darstellung der femoralen Insertionszone der Popliteusehne
- (4) Distalisierung des Schallkopfs und Darstellung des Außenmeniskus
- (5) Finales Bild mit Darstellung folgender Strukturen: femorale Insertionszone der Popliteusehne, Außenmeniskus, Kortikalis des lateralen Tibiaplateaus

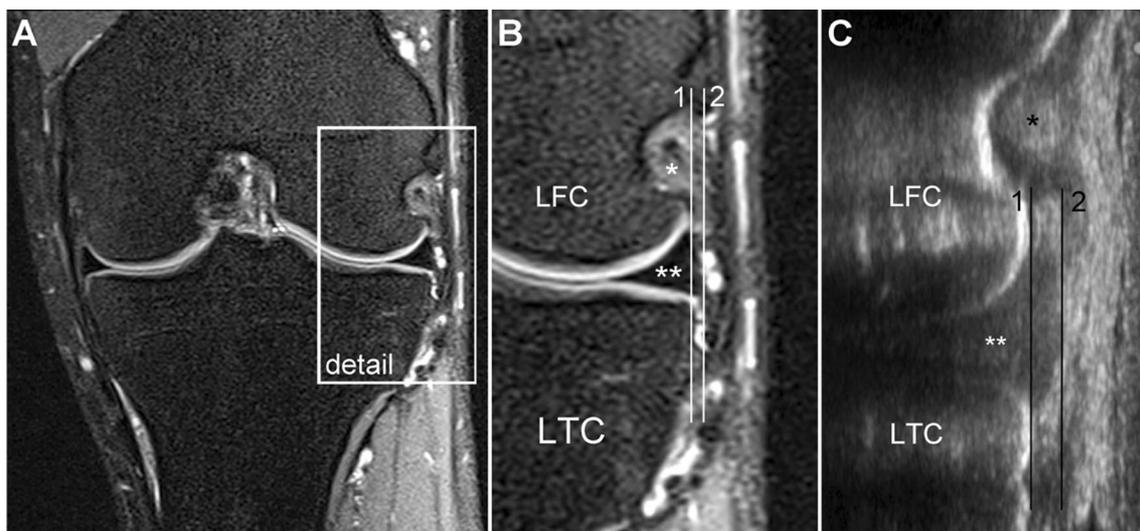


**Abbildung 5: Standardisiertes Ultraschallprotokoll.** (A) Laterale Ansicht eines linken Kniegelenks zur Darstellung relevanter anatomischer Landmarken. Schallkopfpositionierung und entsprechendes Ultraschallbild zur Identifizierung des Fibulaköpfchens und LCL (B1, B2), der femoralen Insertionszone des LCL und der Popliteussehne (C1, C2) sowie des Gelenkspalts mit Außenmeniskus (D1, D2).

(D1, D2). Außenmeniskus (LM); Fibulaköpfchen (FH); lateraler Femurkondylus (LFC); lateraler Tibiakondylus (LTC); LCL (Stern); Popliteussehne (Doppelstern); Bild aus (Winkler, Csapo, et al., 2021).

### 6.3.6 Bildanalyse

Zur Vermessung der MRT-Aufnahmen wurde jene koronare Schicht aufgesucht, wo die femorale Insertionszone der Popliteussehne ersichtlich war. Anschließend wurden die absolute Außenmeniskusextrusion sowie die medio-laterale Breite des Tibiaplateaus gemessen. Die absolute Außenmeniskusextrusion wurde als horizontale Distanz zwischen der lateralen Begrenzung des tibialen Gelenkknorpels und der Außenmeniskusbasis, wie in Abbildung 6 ersichtlich, definiert (Brody, Lin, Hulstyn, & Tung, 2006; Patel et al., 2016).



**Abbildung 6: Messung der Außenmeniskusextrusion.** (A) Koronare, protonendichte-gewichtete Turbo-Spin-Echo-MRT-Sequenz mit Fettunterdrückung eines linken Kniegelenks. (B) Detailausschnitt zur MRT-basierten Messung der Außenmeniskusextrusion. (C) Ultraschallbild zur Messung der Außenmeniskusextrusion. Absolute Außenmeniskusextrusion wurde als horizontale Distanz zwischen Linie 1 und Linie 2 definiert. Außenmeniskus (Doppelstern); lateraler Femurkondylus (LFC); lateraler Tibiakondylus (LTC); Popliteussehne (Stern); Bild aus (Winkler, Csapo, et al., 2021).

Die medio-laterale Breite des Tibiaplateaus wurde als subchondrale Distanz zwischen medialem und lateralem Knorpel-Knochen-Übergang des Tibiaplateaus definiert. Basierend auf diesen Werten konnte die Meniscal Body Extrusion Ratio (MBER) als prozentualer Anteil der absoluten Außenmeniskusextrusion in Relation zur medio-lateralen Breite des Tibiaplateaus berechnet werden (1) (Zhang et al., 2016).

$$MBER [\%] = \frac{\text{absolute Außenmeniskusextrusion}}{\text{medio-laterale Breite des Tibiaplateaus}} \times 100 \quad (1)$$

Die dynamische Außenmeniskusextrusion oder  $\Delta$ -Extrusion wurde als Differenz der absoluten Außenmeniskusextrusion zwischen belastetem ( $aAME_{\text{belastet}}$ ) und unbelastetem ( $aAME_{\text{unbelastet}}$ ) Zustand definiert (2).

$$\Delta_{\text{Extrusion}} [\text{mm}] = aAME_{\text{belastet}} - aAME_{\text{unbelastet}} \quad (2)$$

Zusätzlich zu den durchgeführten Messungen wurden sämtliche MRT-Aufnahmen auf sonstige Auffälligkeiten begutachtet.

Die Ultraschall-basierte Messung der absoluten Außenmeniskusextrusion erfolgte analog zur MRT-basierten Messung (Abbildung 6).

Sämtliche Messungen wurden von zwei Untersuchenden unabhängig voneinander jeweils zweimal mit einem Zeitintervall von zwei Wochen zwischen den Messungen durchgeführt. Beide Untersuchende waren gegenüber dem Belastungszustand der Bilder zum Zeitpunkt der Messung verblindet. Zur Vermessung der MRT-Aufnahmen wurde die frei verfügbare Bildanalyse-Software Horos (Version 3.3.5, abgerufen von <https://horosproject.org>, Annapolis, MD, USA) genutzt. Zur Vermessung der Ultraschallaufnahmen wurde die frei verfügbare Bildanalyse-Software ImageJ (Version 1.52a, abgerufen von <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>, Wayne Rasband, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) herangezogen.

### 6.3.7 Präoperative Daten (Veröffentlichung 1)

Präoperative Daten wurden retrospektiv erhoben und beinhalteten Befunde einer standardisierten klinischen Untersuchung zum Zeitpunkt der Verletzung, PROs (Lysholm Score, VAS für Schmerz, Tegner Aktivitätslevel) sowie die absolute Außenmeniskusextrusion und MBER des verletzten Kniegelenks ohne axiale Belastung gemessen auf präoperativen MRT-Aufnahmen.

## 6.4 Statistische Analyse

Zur statistischen Analyse wurde die Software SPSS (Version 25.0, IBM-SPSS, New York, USA) verwendet. Das Signifikanzniveau wurde mit  $p < 0,05$  festgelegt. Kategoriale Variablen wurden als Anzahl und korrespondierender Prozentsatz berichtet. Nach Beurteilung der Datenverteilung anhand des Shapiro-Wilk-Tests wurden kontinuierliche Variablen als Mittelwert und Standardabweichung (normalverteilt) oder Median und Interquartilsabstand (nicht normalverteilt) berichtet.

### 6.4.1 Veröffentlichung 1

Zum Vergleich der prä- und postoperativen absoluten Außenmeniskusextrusion und MBER sowie der dynamischen Außenmeniskusextrusion (=  $\Delta$ -Extrusion) zwischen operativ versorgten und gesunden kontralateralen Kniegelenken wurde ein gepaarter t-Test genutzt. Zusätzlich wurde eine 2x2-faktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um den Effekt der Faktoren ‚Belastungszustand‘ (belastet vs. unbelastet) und ‚Bein‘ (operiert vs. nicht operiert) sowie eine mögliche Interaktion zwischen ‚Belastungszustand x Bein‘ auf die absolute Außenmeniskusextrusion und die MBER zu ermitteln. Zur Bestimmung der Interrater-Reliabilität der durchgeführten Messungen wurden vorerst die Messungen sämtlicher prä- und postoperativer MRT-Aufnahmen beider Untersuchenden herangezogen und anhand eines gepaarten t-Tests verglichen. Zusätzlich wurden Intraklassenkorrelationskoeffizienten (ICC) basierend auf einem zweifach zufälligen Modell ermittelt (Koo & Li, 2016). Zur Bestimmung der Intrarater-Reliabilität wurden sämtliche Messungen vom Hauptuntersucher zweimal vorgenommen und der ICC basierend auf einem zweifach gemischten Modell ermittelt. Der Standardfehler der durchgeführten

Messungen wurde als Quotient der Standardabweichung der Differenzen der Messwerte sowie der Quadratwurzel von 2 bestimmt (Hopkins, 2000). Zur grafischen Darstellung der Inter- und Intrarater-Reliabilität wurden Streu- und Bland-Altman-Diagramme erstellt.

### 6.4.2 Veröffentlichung 2

Die Reliabilitätstestung des oben genannten Ultraschallprotokolls beruhte auf den eingeschlossenen freiwilligen Proband:innen (= Gruppe I), wohingegen die Validitätsprüfung auf den eingeschlossenen Patient:innen basierte, die sich einer kombinierten VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH unterzogen (= Gruppe II).

Zur Bestimmung der Interrater-Reliabilität wurden sämtliche Ultraschall-basierten Messungen der Außenmeniskusextrusion aus Gruppe I zwischen den beiden Untersuchenden anhand eines gepaarten t-Tests verglichen. Zusätzlich wurden die ICC beruhend auf einem zweifach zufälligen Modell ermittelt (Koo & Li, 2016). Zur Bestimmung der Intrarater-Reliabilität wurden sämtliche Messungen der absoluten Außenmeniskusextrusion im unbelasteten Zustand aus Gruppe I vom Hauptuntersucher zweimal vorgenommen und der ICC basierend auf einem zweifach gemischten Modell ermittelt. Der Standardfehler der erfolgten Messungen wurde als Quotient der Standardabweichung der Differenzen der Messwerte und der Quadratwurzel von 2 bestimmt (Hopkins, 2000). Zur grafischen Darstellung der Inter- und Intrarater-Reliabilität wurden Streudiagramme erstellt. Zur Validitätstestung wurde die Äquivalenz der Ultraschall-basierten und MRT-basierten Messung der absoluten Außenmeniskusextrusion aus Gruppe II basierend auf dem Verfahren von zwei einseitigen t-Tests (= two one-sided t test = TOST) ermittelt (Lakens, 2017). Als Grenzwert der klinischen Äquivalenz wurde eine maximale Streuung von  $\pm 0,5$  mm festgelegt. Zusätzlich wurden ICC und der Standardfehler der durchgeführten Messungen eruiert. Zum Vergleich der absoluten Außenmeniskusextrusion im unbelasteten und belasteten Zustand beider Bildgebungsmodalitäten (Gruppe I und II) sowie zum Vergleich der postoperativen absoluten Außenmeniskusextrusion zwischen operativ

versorgten und gesunden Kniegelenken (Gruppe II) wurde ein gepaarter t-Test herangezogen.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Veröffentlichung 1

#### 7.1.1 Demografische Daten

In Summe konnten zehn Patient:innen (neun Männer und eine Frau) mit einem mittleren Alter von  $25,3 \pm 5,9$  Jahren zum Zeitpunkt der Indexoperation eingeschlossen werden. Die eingeschlossenen Patient:innen wurden durchschnittlich 6,9 Tage (Range, 0–32 Tage) nach der Verletzung operativ versorgt und wurden nach einem mittleren Follow-up von 47,9 Monaten (Range, 12–87 Monate) klinisch und radiologisch nachuntersucht. Demografische und operationsspezifische Daten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

**Tabelle 1: Demografische und operationsspezifische Daten**

Variable	Studiengruppe
Anzahl Patient:innen, n	10
Alter, <sup>a</sup> [Jahre]	25,3 ± 5,9 (18–34)
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	23,0 ± 1,9 (18,2–27,4)
Verletzung zu VKB-Rekonstruktion [Tage]	6,9 ± 11,1 (0–32)
Follow-up [Monate]	47,9 ± 28,2 (12–87)
Männer, n (%)	9 (90 %)
Rechtes Kniegelenk, <sup>b</sup> n (%)	6 (60 %)
Radiärriß	
Partiell, <sup>c</sup> n (%)	6 (60 %)
Komplett, n (%)	4 (40 %)
All-inside-Nähte	
1, n (%)	6 (60 %)
2, n (%)	3 (30 %)
3, n (%)	1 (10 %)
Graft	
Hamstringsehnen Autograft, n (%)	7 (70 %)
Quadrizepssehnen Autograft, n (%)	2 (20 %)
Patellasehnen Autograft, n (%)	1 (10 %)

*Kategoriale Variablen sind als Anzahl (Prozentsatz) dargestellt. Kontinuierliche Variablen sind als Mittelwert ± Standardabweichung (Range) veranschaulicht.*

<sup>a</sup>Alter zum Zeitpunkt der Indexoperation; <sup>b</sup>operativ versorgtes Kniegelenk;

<sup>c</sup> > 50 % der Meniskusbreite betroffen; BMI, Body-Mass-Index; VKB, vorderes Kreuzband

### 7.1.2 Außenmeniskusextrusion

Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH führte im unbelasteten Zustand zu einer statistisch signifikanten Reduktion der absoluten Außenmeniskusextrusion ( $3,2 \pm 1,1$  mm vs.  $2,1 \pm 0,6$  mm;  $p = 0,033$ ) und MBER ( $4,2 \pm 1,3$  vs.  $2,6 \pm 0,6$ ,  $p = 0,021$ ). Basierend auf der 2x2-faktoriellen ANOVA konnte bei der Analyse der postoperativen absoluten Außenmeniskusextrusion ein statistisch signifikanter Effekt der Faktoren ‚Belastungszustand‘ ( $p = 0,029$ ) und ‚Bein‘ ( $p = 0,001$ ), jedoch keine signifikante Interaktion zwischen ‚Belastungszustand‘ und ‚Bein‘ ( $p = 0,795$ ) beobachtet werden. Die Applikation einer axialen Last von 50 % des patientenindividuellen Körpergewichts bewirkte im Durchschnitt eine Zunahme der absoluten Außenmeniskusextrusion um 22 % ( $p = 0,029$ ). Noch ausgeprägter zeigte sich der Effekt des Faktors ‚Bein‘, wobei bei den operierten Kniegelenken im Durchschnitt 93 % mehr absolute Außenmeniskusextrusionen beobachtet wurden im Vergleich zu den nicht operierten Kniegelenken ( $p = 0,001$ ). Diese Ergebnisse spiegelten sich gleichsam in der Analyse der postoperativen MBER wider, wobei ein statistisch signifikanter Effekt der Faktoren ‚Belastungszustand‘ ( $p = 0,028$ ) und ‚Bein‘ ( $p = 0,001$ ) beobachtet wurde, allerdings keine signifikante Interaktion zwischen ‚Belastungszustand‘ und ‚Bein‘ ( $p = 0,787$ ). In Hinblick auf die dynamische Außenmeniskusextrusion konnte kein statistisch signifikanter Unterschied in der  $\Delta$ -Extrusion zwischen operierten und nicht operierten Kniegelenken festgestellt werden ( $0,4 \pm 0,6$  mm vs.  $0,3 \pm 0,6$  mm;  $p = 0,795$ ).

### 7.1.3 Klinische Ergebnisse

Im Zuge des letzten Follow-up-Termins zeigten sich alle Patient:innen mit dem Operationsergebnis zufrieden und berichteten von keinen Einschränkungen in den Aktivitäten des täglichen Lebens. In Summe konnten 9/10 Patient:innen zu ihrem ursprünglichen sportlichen Niveau zurückkehren. Die Ergebnisse der erhobenen PROs sind *Table 2* der Veröffentlichung 1 zu entnehmen.

### 7.1.4 Reliabilität

Es konnten eine gute Interrater-Reliabilität (ICC, 0,898 [95 % Konfidenzintervall, 0,846–0,933]) sowie eine exzellente Intrarater-Reliabilität (ICC, 0,976 [95 % Konfidenzintervall, 0,957–0,987]) der erhobenen Messwerte belegt werden. Es offenbarte sich kein statistisch signifikanter Unterschied in den durchschnittlichen Messwerten der absoluten Außenmeniskusextrusion zwischen Untersucher 1 und Untersucher 2 ( $1,9 \pm 1,1$  mm vs.  $2,0 \pm 1,1$  mm;  $p = 0,240$ ) sowie zwischen den wiederholten Messungen von Untersucher 1 ( $1,9 \pm 1,1$  mm vs.  $1,9 \pm 1,0$  mm;  $p = 0,329$ ).

Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse befindet sich in der entsprechenden Veröffentlichung in Anhang 16.1.

## 7.2 Veröffentlichung 2

In Summe konnten elf Proband:innen (mittleres Alter  $25,5 \pm 3,8$  Jahre; neun Männer, zwei Frauen) in Gruppe I und zehn Patient:innen (mittleres Alter  $30,0 \pm 6,5$  Jahre; acht Männer, zwei Frauen) in Gruppe II eingeschlossen werden.

### 7.2.1 Reliabilitätstestung

Es konnten eine gute Interrater-Reliabilität (ICC, 0,904 [95 % Konfidenzintervall, 0,824–0,947]) sowie eine exzellente Intrarater-Reliabilität (ICC, 0,942 [95 % Konfidenzintervall, 0,861–0,976]) der Ultraschall-basierten Messung der absoluten Außenmeniskusextrusion ermittelt werden. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied in den durchschnittlichen Ultraschall-basierten Messwerten der absoluten Außenmeniskusextrusion der Gruppe I zwischen Untersucher 1 und Untersucher 2 ( $2,5 \pm 0,6$  mm vs.  $2,5 \pm 0,7$  mm;  $p = 0,491$ ) sowie zwischen den wiederholten Messungen im unbelasteten Zustand von Untersucher 1 ( $2,6 \pm 0,5$  mm vs.  $2,7 \pm 0,5$  mm;  $p = 0,412$ ).

### 7.2.2 Validitätstestung

Es konnte veranschaulicht werden, dass in Gruppe II die Ultraschall-basierte Bestimmung der absoluten Außenmeniskusextrusion ( $2,9 \pm 0,8$  mm) im Durchschnitt  $1,1$  mm (61 %) höher ausfiel als die MRT-basierte Bestimmung der absoluten Außenmeniskusextrusion ( $1,8 \pm 0,9$  mm). Mithin konnte anhand des Äquivalenztests (TOST-Verfahren) nachgewiesen werden, dass die genannten Mittelwerte (Ultraschall- und MRT-basierte Messungen der absoluten Außenmeniskusextrusion) nicht innerhalb des vordefinierten Grenzwerts von  $\pm 0,5$  mm lagen. Dessen ungeachtet konnte anhand des ICC eine schwache Übereinstimmung der Ultraschall- und MRT-basierten Messung der absoluten Außenmeniskusextrusion bestätigt werden (ICC, 0,439 [95 % Konfidenzintervall, 0,221–0,750]).

Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse ist der entsprechenden Veröffentlichung in Anhang 16.2 zu entnehmen.

## 8 Diskussion

Die relevanteste Erkenntnis des vorliegenden Forschungsprojekts besteht darin, dass die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses des AM-HH zu einer signifikanten Reduktion der absoluten Außenmeniskusextrusion führt. Zusätzlich konnte das physiologische dynamische Verhalten des Außenmeniskus (Zunahme der Außenmeniskusextrusion nach axialer Lastaufbringung) durch die Meniskusnaht aufrechterhalten werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Außenmeniskusextrusion mithilfe eines standardisierten Ultraschallprotokolls reproduzierbar bestimmt werden kann.

Die Auswirkungen von Radiärissen des Außenmeniskus auf die Kontaktmechanik des Kniegelenks wurden in biomechanischen Studien belegt. In einer Studie konnte nachgewiesen werden, dass ein vollständiger Radiärriss des AM-HH unter 800-N-axialer Belastung in 0°- und 60°-Knieflexion zu einer statistisch signifikanten Zunahme des tibiofemorale Kontaktdrucks sowie einer signifikanten Abnahme der kraftübertragenden Fläche im lateralen Kompartiment

im Vergleich zum nativen Zustand führt. Nach erfolgter All-inside- oder Inside-out-Naht des Radiärrisses wurde der tibiofemorale Kontaktdruck des nativen Gelenks wiederhergestellt. Die kraftübertragende Fläche blieb indes weiterhin signifikant reduziert (Ode et al., 2012). In einer weiteren Studie wurde der Effekt eines Radiärrisses im AM-HH in den Phasen mit maximaler Kompressionsbelastung des Kniegelenks während der Standphase eines simulierten Gangs analysiert. Hierzu wurden 2100-N-axiale Last bei 8°- und 15°-Knieflexion auf die Kniegelenkspräparate appliziert. Auch bei dieser Studie zeigten sich eine statistisch signifikante Zunahme des tibiofemorale Kontaktdrucks sowie eine Abnahme der kraftübertragenden Fläche nach Erzeugung eines 90 %-igen Radiärrisses. Im Vergleich zum Zustand mit Radiärriss bewirkte auch hier eine Inside-out-Naht des Radiärrisses eine statistisch signifikante Abnahme des tibiofemorale Kontaktdrucks, sodass der native Zustand nahezu wiederhergestellt wurde. Die kraftübertragende Fläche des lateralen Kompartiments blieb jedoch weiterhin reduziert (Bedi et al., 2012). Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Es konnte dargelegt werden, dass die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH eine Aufrechterhaltung der dynamischen Außenmeniskusextrusion bedingt, was auf ein intaktes Verhalten des Außenmeniskus als Reaktion auf axiale Kompression hindeutet. Die dennoch beobachtete signifikant erhöhte absolute Außenmeniskusextrusion in operativ versorgten Kniegelenken im Vergleich zu den kontralateralen gesunden Kniegelenken reflektiert die in den genannten Studien verbleibende reduzierte kraftübertragende Kontaktfläche des lateralen Kompartiments nach durchgeführter Meniskusnaht. Ob eine persistierende erhöhte Außenmeniskusextrusion die Entwicklung einer frühzeitigen Gonarthrose begünstigt, bleibt jedoch Gegenstand zukünftiger Forschung.

Kürzlich wurde eine statistisch signifikante Korrelation zwischen tibiofemorale Kompartimentdruck und entsprechender Meniskusextrusion nachgewiesen (Willinger et al., 2020). Zusätzlich konnte eine signifikant größere Meniskusextrusion bei Patient:innen mit Meniskuswurzelläsion im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe festgestellt werden (3,6 mm vs. 1,3 mm) (Karpinski et al., 2019). Folglich wurde für das vorliegende Forschungsprojekt die

Außenmeniskusextrusion als objektiver Parameter zur postoperativen Beurteilung der funktionellen Integrität des Außenmeniskus verwendet. Im untersuchten Patientenkollektiv konnte im unbelasteten Zustand eine signifikante Abnahme der Außenmeniskusextrusion nach durchgeführter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses im Bereich des AM-HH beobachtet werden ( $3,2 \pm 1,1$  mm vs.  $2,1 \pm 0,6$  mm). Diese Beobachtung steht im Einklang mit bereits publizierter Literatur (Ahn et al., 2010). In einer Verlaufsuntersuchung nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses im AM-HH konnte nach durchschnittlich 18 Monaten bei 18 Patient:innen eine Abnahme der Außenmeniskusextrusion von prä- zu postoperativ ( $0,7$  mm vs.  $0,3$  mm) ermittelt werden (Ahn et al., 2010). Dies lässt schlussfolgern, dass die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärisses im AM-HH die funktionelle Integrität des Außenmeniskus wiederherstellt.

Zur Stärkung dieser Vermutung wurde zusätzlich die dynamische Außenmeniskusextrusion analysiert. Die dynamische Meniskusextrusion (=  $\Delta$ -Extrusion) reflektiert die Zunahme der Meniskusextrusion unter axialer Kompression und stellt somit die Differenz zwischen belastetem und unbelastetem Zustand dar (Achnich et al., 2018; Karpinski et al., 2019). In mehreren Studien konnte eine Zunahme sowohl der Innen- als auch der Außenmeniskusextrusion unter axialer Lastaufbringung nachgewiesen werden (Achnich et al., 2018; Diermeier et al., 2019; Karpinski et al., 2019; Patel et al., 2016). In einer kürzlich publizierten Studie konnte bei Patient:innen mit vollständiger Unterbrechung des Meniskusrings im Sinne einer postero-medialen Meniskuswurzelverletzung eine mittlere dynamische Innenmeniskusextrusion ( $\Delta$ -Extrusion) von  $0,1 \pm 0,2$  mm beobachtet werden. In einer zusätzlich untersuchten gesunden Kontrollgruppe offenbarte sich eine statistisch signifikant größere dynamische Innenmeniskusextrusion von durchschnittlich  $1,0 \pm 0,4$  mm (Karpinski et al., 2019). Dies deutet darauf hin, dass die Unterbrechung des Meniskusrings eine signifikante Reduktion bzw. ein Sistieren der dynamischen Meniskusextrusion bewirkt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde postoperativ kein Unterschied in der dynamischen Außenmeniskusextrusion ( $\Delta$ -Extrusion) zwischen operativ versorgten und kontralateralen gesunden

Kniegelenken festgestellt ( $0,4 \pm 0,6$  mm vs.  $0,3 \pm 0,6$  mm). Trotz signifikant größerer absoluter Außenmeniskusextrusion in operativ versorgten im Vergleich zu gesunden Kniegelenken konnte keine statistisch signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren ‚Belastungszustand‘ und ‚Bein‘ beobachtet werden. Dies unterstreicht das intakte dynamische Verhalten des genähten Außenmeniskus, da kein Unterschied in der kompressionsassoziierten Zunahme der Außenmeniskusextrusion zwischen gesunden und operativ versorgten Kniegelenken beobachtet wurde. Dadurch wird die Hypothese, dass eine All-inside-Naht eines Radiärrisses im AM-HH die funktionelle Integrität des Meniskus wiederherstellt, gestärkt.

Der Erfolg von kombinierter VKB-Rekonstruktion und Außenmeniskusnaht ist auch aus den erhobenen klinischen und funktionellen Daten ersichtlich. Nach durchschnittlich 47,9 Monaten lag die Reoperationsrate bei 0 % und sämtliche nachuntersuchten Patient:innen waren mit dem Operationsergebnis subjektiv zufrieden. Im Vergleich hierzu konnte in einer Studie, in der 31 Kniegelenke nach partieller lateraler Meniskektomie nach durchschnittlich 10,3 Jahren nachuntersucht wurden, eine Reoperationsrate von 29 % beobachtet werden. Zusätzlich wurde ein mittlerer Lysholm-Score von  $80,5 \pm 16,7$  Punkten auffällig, was einen klinisch relevanten Unterschied zum vorliegenden Patientenkollektiv nach erfolgter Außenmeniskusnaht darstellt ( $91,4 \pm 7,9$  Punkte) (Hoser et al., 2001). Dies könnte auf den hohen Prozentsatz an Patient:innen mit hochgradiger Gonarthrose (41 %) nach partieller lateraler Meniskektomie zurückzuführen sein und unterstreicht gleichzeitig den klinischen Stellenwert der Meniskusnaht (Hoser et al., 2001). Dies wurde in einer weiteren Studie bestätigt, wobei bei 41 Patient:innen nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und Naht eines Lappen- oder Radiärrisses des AM-HH nach mindestens zwei Jahren Follow-up keine Gelenkspaltverschmälerung festzustellen war (Tsuji et al., 2019). Bei 62 Patient:innen mit kombinierter VKB-Rekonstruktion und Außenmeniskusnaht wurden nach zwei Jahren Follow-up vergleichbare Werte sämtlicher Subskalen des KOOS (Symptome, 85,7 vs. 88,9; Schmerz, 91,7 vs. 95,6; ADL, 98,5 vs. 99,6; Sports/Rec, 90,0 vs. 94,5; QOL, 75,0 vs. 80,6) sowie des IKDC-SKF (82,2 vs. 91,4) im Vergleich zum vorliegenden Patientenkollektiv berichtet (Westermann et al., 2014). Dies steht in Übereinstimmung mit einer weiteren

Studie, wo nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH bei 25 Patient:innen nach durchschnittlich 18 Monaten Follow-up ähnliche Werte des Lysholm-Scores (92,9 vs. 91,4) und des IKDC-SKF (92,9 vs. 91,4) im Vergleich zum vorliegenden Forschungsprojekt berichtet wurden (Ahn et al., 2010). Die klinisch hervorragenden Ergebnisse von kombinierter VKB-Rekonstruktion und Meniskusnaht konnten in einer kürzlich veröffentlichten Studie anhand von 5 378 Patient:innen bestätigt werden. Sowohl nach einem als auch nach zwei Jahren Follow-up konnte kein Unterschied in sämtlichen Subskalen des KOOS zwischen primärer VKB-Rekonstruktion und kombinierter VKB-Rekonstruktion mit Innen- und/oder Außenmeniskusnaht festgestellt werden (Cristiani et al., 2020).

Angesichts der schnellen Verfügbarkeit, der kostengünstigen Anwendung und der hohen Bildauflösung hat die Ultraschalluntersuchung der Menisken in den vergangenen Jahren an Popularität gewonnen. Als bedeutendster Nachteil der Ultraschalluntersuchung ist die hohe Untersucherabhängigkeit in der Befunderhebung mit teils geringer Reliabilität sowie mangelnder Genauigkeit zu nennen. Zur Steigerung der Reliabilität wird die Anwendung standardisierter Untersuchungsprotokolle basierend auf anatomischen Landmarken empfohlen. Diese konnte bereits mehrfach für die Evaluation des Innenmeniskus nachgewiesen werden (Achnich et al., 2018; Reisner et al., 2020). Bei Verwendung des Epikondylus medialis femoris sowie des dreischichtig aufgebauten MCLs als anatomische Landmarken konnte mittels eines standardisierten Untersuchungsprotokolls eine moderate bis exzellente Reliabilität für die Messung der Innenmeniskusextrusion erzielt werden (Achnich et al., 2018; Reisner et al., 2020). Der Ultraschalldiagnostik des Außenmeniskus wurde bislang nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Insbesondere die Evaluation der Außenmeniskusextrusion mithilfe von Ultraschall wurde lediglich in kleinen Fallserien beschrieben (Riecke et al., 2014; Rowland, Mar, McIlff, & Nelson, 2016; Verdonk et al., 2004). Als größte Limitation dieser Fallserien ist eine unzureichende Beschreibung des angewandten Ultraschallprotokolls zu nennen. Dies mag der komplexeren Anatomie des Außenmeniskus sowie den posterolateralen Strukturen geschuldet sein. In zwei Studien wurde als anatomische Landmarke lediglich das LCL ohne eine detaillierte Erläuterung der

Schallkopfpositionierung geschildert (Rowland et al., 2016; Verdonk et al., 2004). In einer weiteren Studie wurde auf eine Beschreibung der Schallkopfpositionierung vollständig verzichtet (Riecke et al., 2014). Zudem ist den genannten Studien keine Reliabilitätstestung der erfolgten Messungen zu entnehmen, was auf die vermeintlich hohe Variabilität aufgrund eines fehlenden und validierten Protokolls zurückzuführen ist. Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte ein standardisiertes Protokoll zur Ultraschall-basierten Bestimmung der Außenmeniskusextrusion beruhend auf vordefinierten anatomischen Landmarken implementiert und validiert werden. Als anatomische Landmarken dienten das Fibulaköpfchen, LCL sowie der Sulcus Popliteus mit der femoralen Insertionszone der Popliteusehne. Aufgrund der einfachen und reproduzierbaren sonografischen Darstellung der genannten anatomischen Landmarken konnten eine gute Interrater-Reliabilität sowie eine exzellente Intrarater-Reliabilität der Ultraschall-basierten Messung der absoluten Außenmeniskusextrusion belegt werden. Im Zuge der Validitätstestung wurde indes eine gewisse Abweichung zur MRT-basierten Bestimmung der absoluten Außenmeniskusextrusion beobachtet. Die Ultraschall-basierten Messungen fielen im Vergleich zu den MRT-basierten Messungen der absoluten Außenmeniskusextrusion im Durchschnitt 1,1 mm höher aus. Diese Abweichung muss beim Vergleich Ultraschall-basierter und MRT-basierter Messwerte berücksichtigt werden, was insbesondere zum Vergleich mit weiteren Studien bedacht werden sollte. Angesichts der hohen Reliabilität stellt diese Abweichung allerdings keine Limitation der Ultraschall-basierten Bestimmung der Außenmeniskusextrusion im Zuge longitudinaler Verlaufsuntersuchungen dar.

Versagensraten nach isolierter und kombinierter Meniskusnaht von 10–24 % erfordern eine stetige Weiterentwicklung in der Meniskuschirurgie (Fillingham, Riboh, Erickson, Bach, & Yanke, 2017; Grant, Wilde, Miller, & Bedi, 2012; Nepple et al., 2012; Westermann et al., 2014). Im Zuge der *5<sup>th</sup> International Conference on Meniscus Science and Surgery* wurde eine Umfrage unter 76 teilnehmenden Expert:innen zu den aktuellen Forschungsgebieten zur Verbesserung der Meniskuschirurgie durchgeführt. Entsprechend der Umfrage liegen die aktuellen Forschungstrends vornehmlich in den Bereichen Meniskusnaht, Biologie und chirurgische Medizinprodukte. Bei Patient:innen mit bereits vorliegender

Meniskusinsuffizienz gehen die Forschungstrends in Richtung Osteotomie, Meniskustransplantation und ebenso Biologie. Das unter den Expert:innen am wertvollsten erachtete biologische Verfahren zur Augmentation von Meniskusnähten ist die additive Applikation autologer Blutprodukte, zum Beispiel thrombozytenreiches Blutplasma. Gleichwohl ist hierbei zu bedenken, dass knapp 30 % der Expert:innen keine der verfügbaren biologischen Augmentationsverfahren als hilfreich ansehen. Als vielversprechendste medizintechnische Hilfsmittel werden der 3D-Druck sowie die Entwicklung künstlicher Implantate zum Meniskusersatz betrachtet (DePhillipo et al., 2021). Tissue Engineering im Bereich der Meniskuschirurgie befasst sich aktuell mit der Entwicklung von mit Zellen besiedelten künstlichen Meniskusimplantaten. Die Zellaugmentation von Meniskusimplantaten soll das natürliche zelluläre Milieu aufrechterhalten und somit die Zellproliferation und Zelldifferenzierung fördern. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung biokompatibler Materialien, die die mechanischen und viskoelastischen Materialeigenschaften des nativen Meniskus möglichst imitieren (Winkler, Rothrauff, et al., 2020). Angesichts der intensiven internationalen und interdisziplinären Forschungsbemühungen im Bereich der Meniskuschirurgie kann erwartungsvoll in die Zukunft geblickt werden, um langfristig die klinischen und funktionellen Ergebnisse von Patient:innen mit Meniskusschäden zu verbessern.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts lieferten neue und klinisch relevante Erkenntnisse für die Therapie kombinierter VKB-Verletzungen und radiärer AM-HH-Risse. Dennoch sind einige Limitationen zu nennen, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten sind. Die strikten Ein- und Ausschlusskriterien (primäre VKB-Ruptur kombiniert mit Radiärriss des AM-HH bei gleichzeitig gesundem kontralateralen Kniegelenk ohne chirurgische Vorgeschichte) in Kombination mit der zeitaufwendigen Nachuntersuchung (MRT, Ultraschall, klinische Untersuchung, Fragebögen) limitierte die Anzahl an Patient:innen, die eingeschlossen werden konnten. Nichtsdestotrotz ergab sich durch die Untersuchung jeweils beider Kniegelenke ein ausreichend großer Datensatz, um statistische Vergleiche und folglich klinisch relevante Schlussfolgerungen ziehen zu können. Aufgrund des retrospektiven Studiendesigns konnten prä- und postoperative Vergleiche ausschließlich für unbelastete MRT-Aufnahmen der

operativ versorgten Kniegelenke aufgestellt werden, was eine weitere Limitation verkörpert. Zukünftig sollen prospektiv Daten gesammelt werden, um auch im verletzten präoperativen Zustand die Außenmeniskusextrusion im belasteten Zustand zu evaluieren. Die Anwendung einer nicht ferromagnetischen, MRT-tauglichen Lagerungsschiene ermöglichte eine individuelle axiale Lastaufbringung. Dadurch konnte die Außenmeniskusextrusion mittels MRT in einem belasteten und reproduzierbaren Zustand quantifiziert werden, was eine wesentliche Neuheit repräsentiert.

### **9 Schlussfolgerung**

Basierend auf den vorliegenden Daten ließ sich veranschaulichen, dass die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH zu einer signifikanten Reduktion der absoluten Außenmeniskusextrusion führt. Das dynamische Verhalten des Außenmeniskus konnte durch eine signifikante Zunahme der absoluten Außenmeniskusextrusion nach axialer Lastaufbringung demonstriert werden. Trotz signifikant größerer absoluter Außenmeniskusextrusion in operativ versorgten Kniegelenken im Vergleich zu kontralateralen gesunden Kniegelenken wurde eine Aufrechterhaltung des dynamischen Verhaltens des Außenmeniskus nach erfolgter All-inside-Naht beobachtet. Zusätzlich konnte dargelegt werden, dass die Ultraschalluntersuchung ein zuverlässiges Verfahren zur Quantifizierung der Außenmeniskusextrusion darstellt.

## 10 Zusammenfassungen

### 10.1 Veröffentlichung 1 („*Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair*“)

**Hintergrund:** Eine traumatische VKB-Ruptur ist vielfach von einem Radiärriß des AM-HH mit konsekutiver pathologischer Außenmeniskusextrusion (AME) begleitet. Das dynamische Verhalten des Außenmeniskus nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und Außenmeniskusnaht wurde bislang nur unzureichend untersucht.

**Ziel der Arbeit:** Quantitative Analyse der dynamischen AME nach kombinierter VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrißes des AM-HH.

**Material und Methoden:** Es wurden Patient:innen in die Studie eingeschlossen, die sich einer kombinierten VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrißes des AM-HH unterzogen. Frühere Verletzungen oder Operationen des kontralateralen Kniegelenks führten zum Studienausschluss. MRT-Aufnahmen des operativ versorgten und gesunden kontralateralen Kniegelenks wurden in einem unbelasteten und belasteten Zustand (50 % des Körpergewichts) aufgenommen. Eine pneumatische Lagerungsschiene wurde zur standardisierten Lagerung des Kniegelenks (10°-Flexion) im MRT sowie zur axialen Lastaufbringung herangezogen. Zur Quantifizierung der AME wurden folgende Parameter erhoben: absolute AME, Meniscal Body Extrusion Ratio und  $\Delta$ -Extrusion. Ein gepaarter t-Test sowie eine 2x2-faktorielle ANOVA wurden zur statistischen Analyse genutzt.

**Ergebnisse:** In Summe wurden zehn Patient:innen nach einem mittleren Follow-up von 47,9 Monaten eingeschlossen. Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht des Radiärrißes des AM-HH führte im unbelasteten Zustand zu einer Abnahme der AME von  $3,2 \pm 1,1$  mm zu  $2,1 \pm 0,6$  mm (-32 %;  $p = 0,033$ ). Die axiale Lastaufbringung bewirkte eine signifikante Zunahme der AME ( $+0,3$  mm [+22 %];  $p = 0,029$ ). Eine signifikant größere AME wurde in operativ versorgten im Vergleich zu gesunden Kniegelenken beobachtet ( $+1,1$  mm [+93 %];  $p = 0,001$ ). Es konnte kein Unterschied in der kompressionsassoziierten Zunahme der AME zwischen operativ versorgten und gesunden Kniegelenken festgestellt werden.

**Schlussfolgerung:** Die kombinierte VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrißes des AM-HH bedingte eine Reduktion der AME. Ein

meniskuserhaltendes Vorgehen ist im Fall eines Radiärisses des AM-HH empfohlen, um das dynamische Verhalten des Außenmeniskus wiederherzustellen.

### **Leistungsbeiträge des Doktoranden:**

Die initiale Literaturrecherche, Verfassung des Ethikantrags und Planung des Studienablaufs wurden von Philipp W. Winkler durchgeführt. Die Untersuchung der Patient:innen sowie Beurteilung und Vermessung der angefertigten MRT-Aufnahmen erfolgte unter Supervision und Zusammenarbeit der Ko-Autoren und Philipp W. Winkler. Die statistische Auswertung der erhobenen Daten fand in Zusammenarbeit mit Priv.-Doz. Dr. Robert Csapo statt. Die Interpretation der Ergebnisse geschah in Zusammenarbeit mit sämtlichen Ko-Autoren. Die initiale Verfassung des Manuskripts wurde durch Philipp W. Winkler vorgenommen. Nach kritischer Durchsicht und Begutachtung sämtlicher Ko-Autoren wurde die finale Version des Manuskripts erstellt und durch den Doktoranden zur Publikation in einem internationalem Fachjournal sowie zur Präsentation auf einem internationalen Fachkongress eingereicht.

## **10.2 Veröffentlichung 2 („*Sonographic Evaluation of Lateral Meniscal Extrusion: Implementation and Validation*“)**

**Hintergrund:** Die Meniskusextrusion ist ein objektiver Parameter, der als Prädiktor und Indikator für diverse Kniegelenkspathologien herangezogen wird. Bislang lag der Fokus auf der Beurteilung der Innenmeniskusextrusion, die mittels Ultraschalluntersuchung zuverlässig erhoben werden kann. Ein standardisiertes Vorgehen zur Ultraschall-basierten Evaluierung der AME ist bislang ausständig.

**Ziel der Arbeit:** Prüfung der Reliabilität und Validität der Ultraschall-basierten Messung der AME basierend auf einem standardisierten Untersuchungsprotokoll.

**Material und Methoden:** In Gruppe 1 wurden elf freiwillige Proband:innen ohne Vorgeschichte einer Kniegelenksverletzung zur Reliabilitätsprüfung eingeschlossen, während sich Gruppe 2 zur Validitätsprüfung aus zehn Patient:innen zusammensetzte, die sich einer kombinierten VKB-Rekonstruktion und All-inside-Naht eines Radiärrisses des AM-HH unterzogen. In beiden Gruppen wurde die AME beider Kniegelenke anhand eines standardisierten Ultraschallprotokolls von zwei unabhängigen Untersuchenden bestimmt. In Gruppe 2 wurde die AME beider Kniegelenke zusätzlich mittels MRT erfasst. Die AME wurde jeweils in zwei Belastungszuständen (Zustand 1, unbelastet; Zustand 2, axiale Belastung mit 50 % Körpergewicht) gemessen. Wiederholte Ultraschallmessungen von zwei unabhängigen Untersuchenden wurden zur Reliabilitätsbestimmung durchgeführt. Ein Vergleich zwischen der Ultraschall-basierten AME und MRT-basierten AME wurde zur Validitätsprüfung aufgestellt.

**Ergebnisse:** Anhand der analysierten Ultraschallaufnahmen jedes Untersuchenden (n = 66) konnten eine gute Interrater-Reliabilität (ICC, 0,904) sowie eine exzellente Intrarater-Reliabilität (ICC, 0,942) der Ultraschall-basierten Messung der AME festgestellt werden. Es offenbarte sich eine schwache Übereinstimmung der Ultraschall-basierten und MRT-basierten Messung der AME (ICC, 0,439). Die Ultraschall-basierten Messungen der AME waren durchschnittlich um 1,1 mm größer als die MRT-basierten Messungen.

**Schlussfolgerung:** Anhand eines standardisierten Protokolls ist eine zuverlässige Bestimmung der AME mittels Ultraschalluntersuchung möglich.

Gleichwohl zeigt sich eine gewisse Abweichung zur MRT-basierten Messung der AME.

### **Leistungsbeiträge des Doktoranden:**

Die initiale Literaturrecherche, Verfassung des Ethikantrags und Planung des Studienablaufs wurden von Philipp W. Winkler durchgeführt. Die Untersuchung der Patient:innen sowie Anfertigung und Vermessung der Ultraschallaufnahmen erfolgte unter Supervision und Zusammenarbeit der Ko-Autoren und Philipp W. Winkler. Die statistische Auswertung der erhobenen Daten fand in Zusammenarbeit mit Priv.-Doz. Dr. Robert Csapo statt. Die Interpretation der Ergebnisse geschah in Zusammenarbeit mit sämtlichen Ko-Autoren. Die initiale Verfassung des Manuskripts wurde durch Philipp W. Winkler vorgenommen. Nach kritischer Durchsicht und Begutachtung sämtlicher Ko-Autoren wurde die finale Version des Manuskripts erstellt und durch den Doktoranden zur Publikation in einem internationalem Fachjournal eingereicht.

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zonengliederung der Menisken .....	10
Abbildung 2: Spezielle Anatomie des Außenmeniskus .....	12
Abbildung 3: Umfangsspannung .....	15
Abbildung 4: Pneumatische Lagerungsschiene .....	27
Abbildung 5: Standardisiertes Ultraschallprotokoll .....	29
Abbildung 6: Messung der Außenmeniskusextrusion .....	30

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Demographische und operationsspezifische Daten .....	34
---	----

## 13 Abkürzungsverzeichnis

ADL.....	Tätigkeiten des Alltags
ANOVA.....	Varianzanalyse
AME.....	Außenmeniskusextrusion
AM-HH.....	AM-HH
FOV.....	Bildfeld
HKB.....	Hinteres Kreuzband
ICC.....	Intraklassenkorrelationskoeffizient
IKDC-SKF..	International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form
KOOS.....	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score
LCL.....	Laterales Kollateralband
MBER.....	Meniscal Body Extrusion Ratio
MCL.....	Mediales Kollateralband
MFL.....	Meniskofemorales Ligament
MRT.....	Magnetresonanztomographie
NFL.....	National Football League
PRO.....	Patient-Reported Outcomes
QOL.....	Lebensqualität im Zusammenhang mit dem betroffenen Kniegelenk
Sports/Rec.....	Funktionsfähigkeit im Sport und in der Freizeit
TR/TE.....	Repetitionszeit/Echozeit
TOST.....	Two one-sided t test
VAS.....	Visuelle Analogskala
VKB.....	Vorderes Kreuzband

## 14 Literaturverzeichnis

- Achtnich, A., Petersen, W., Willinger, L., Sauter, A., Rasper, M., Wörtler, K., et al. (2018). Medial meniscus extrusion increases with age and BMI and is depending on different loading conditions. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 26(8), 2282-2288. doi:10.1007/s00167-018-4885-7
- Ahn, J. H., Lee, Y. S., Yoo, J. C., Chang, M. J., Park, S. J., & Pae, Y. R. (2010). Results of arthroscopic all-inside repair for lateral meniscus root tear in patients undergoing concomitant anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*, 26(1), 67-75. doi:10.1016/j.arthro.2009.07.007
- Altman, R., Asch, E., Bloch, D., Bole, G., Borenstein, D., Brandt, K., et al. (1986). Development of criteria for the classification and reporting of osteoarthritis. Classification of osteoarthritis of the knee. Diagnostic and Therapeutic Criteria Committee of the American Rheumatism Association. *Arthritis Rheum*, 29(8), 1039-1049. doi:10.1002/art.1780290816
- Aman, Z. S., DePhillipo, N. N., Storaci, H. W., Moatshe, G., Chahla, J., Engebretsen, L., et al. (2019). Quantitative and Qualitative Assessment of Posterolateral Meniscal Anatomy: Defining the Popliteal Hiatus, Popliteomeniscal Fascicles, and the Lateral Meniscotibial Ligament. *Am J Sports Med*, 47(8), 1797-1803. doi:10.1177/0363546519849933
- Arnoczky, S. P., & Warren, R. F. (1982). Microvasculature of the human meniscus. *Am J Sports Med*, 10(2), 90-95. doi:10.1177/036354658201000205
- Aune, K. T., Andrews, J. R., Dugas, J. R., & Cain, E. L., Jr. (2014). Return to Play After Partial Lateral Meniscectomy in National Football League Athletes. *Am J Sports Med*, 42(8), 1865-1872. doi:10.1177/0363546514535069
- Baratz, M. E., Fu, F. H., & Mengato, R. (1986). Meniscal tears: the effect of meniscectomy and of repair on intraarticular contact areas and stress in the human knee. A preliminary report. *Am J Sports Med*, 14(4), 270-275. doi:10.1177/036354658601400405
- Becker, R., Kopf, S., Seil, R., Hirschmann, M. T., Beaufils, P., & Karlsson, J. (2020). From meniscal resection to meniscal repair: a journey of the last

- decade. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 28(11), 3401-3404.  
doi:10.1007/s00167-020-06316-7
- Bedi, A., Kelly, N., Baad, M., Fox, A. J., Ma, Y., Warren, R. F., et al. (2012). Dynamic contact mechanics of radial tears of the lateral meniscus: implications for treatment. *Arthroscopy*, 28(3), 372-381.  
doi:10.1016/j.arthro.2011.08.287
- Blyth, M., Anthony, I., Francq, B., Brooksbank, K., Downie, P., Powell, A., et al. (2015). Diagnostic accuracy of the Thessaly test, standardised clinical history and other clinical examination tests (Apley's, McMurray's and joint line tenderness) for meniscal tears in comparison with magnetic resonance imaging diagnosis. *Health Technol Assess*, 19(62), 1-62.  
doi:10.3310/hta19620
- Borchers, J. R., Kaeding, C. C., Pedroza, A. D., Huston, L. J., Spindler, K. P., & Wright, R. W. (2011). Intra-articular findings in primary and revision anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a comparison of the MOON and MARS study groups. *Am J Sports Med*, 39(9), 1889-1893.  
doi:10.1177/0363546511406871
- Brambilla, L., Pulici, L., Carimati, G., Quaglia, A., Prospero, E., Bait, C., et al. (2015). Prevalence of Associated Lesions in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Correlation With Surgical Timing and With Patient Age, Sex, and Body Mass Index. *Am J Sports Med*, 43(12), 2966-2973.  
doi:10.1177/0363546515608483
- Briggs, K. K., Lysholm, J., Tegner, Y., Rodkey, W. G., Kocher, M. S., & Steadman, J. R. (2009). The reliability, validity, and responsiveness of the Lysholm score and Tegner activity scale for anterior cruciate ligament injuries of the knee: 25 years later. *Am J Sports Med*, 37(5), 890-897.  
doi:10.1177/0363546508330143
- Brody, J. M., Lin, H. M., Hulstyn, M. J., & Tung, G. A. (2006). Lateral meniscus root tear and meniscus extrusion with anterior cruciate ligament tear. *Radiology*, 239(3), 805-810. doi:10.1148/radiol.2393050559
- Butler, D. L., Noyes, F. R., & Grood, E. S. (1980). Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. *J Bone Joint Surg Am*, 62(2), 259-270.

- Cavaignac, E., Sylvie, R., Teulières, M., Fernandez, A., Frosch, K. H., Gomez-Brouchet, A., et al. (2021). What Is the Relationship Between the Distal Semimembranosus Tendon and the Medial Meniscus? A Gross and Microscopic Analysis From the SANTI Study Group. *Am J Sports Med*, 49(2), 459-466. doi:10.1177/0363546520980076
- Chatain, F., Adeleine, P., Chambat, P., & Neyret, P. (2003). A comparative study of medial versus lateral arthroscopic partial meniscectomy on stable knees: 10-year minimum follow-up. *Arthroscopy*, 19(8), 842-849. doi:10.1016/s0749-8063(03)00735-7
- Crawford, M. D., Hellwinkel, J. E., Aman, Z., Akamefula, R., Singleton, J. T., Bahney, C., et al. (2020). Microvascular Anatomy and Intrinsic Gene Expression of Menisci From Young Adults. *Am J Sports Med*, 48(13), 3147-3153. doi:10.1177/0363546520961555
- Cristiani, R., Parling, A., Forssblad, M., Edman, G., Engström, B., & Stålmán, A. (2020). Meniscus Repair Does Not Result in an Inferior Short-term Outcome Compared With Meniscus Resection: An Analysis of 5,378 Patients With Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy*, 36(4), 1145-1153. doi:10.1016/j.arthro.2019.11.124
- DePhillipo, N. N., LaPrade, R. F., Zaffagnini, S., Mouton, C., Seil, R., & Beaufils, P. (2021). The future of meniscus science: international expert consensus. *J Exp Orthop*, 8(1), 24. doi:10.1186/s40634-021-00345-y
- Diermeier, T., Beitzel, K., Bachmann, L., Petersen, W., Esefeld, K., Wörtler, K., et al. (2019). Mountain ultramarathon results in temporary meniscus extrusion in healthy athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 27(8), 2691-2697. doi:10.1007/s00167-018-5303-x
- Fairbank, T. J. (1948). Knee joint changes after meniscectomy. *J Bone Joint Surg Br*, 30b(4), 664-670.
- Fetzer, G. B., Spindler, K. P., Amendola, A., Andrish, J. T., Bergfeld, J. A., Dunn, W. R., et al. (2009). Potential market for new meniscus repair strategies: evaluation of the MOON cohort. *J Knee Surg*, 22(3), 180-186. doi:10.1055/s-0030-1247746
- Fillingham, Y. A., Riboh, J. C., Erickson, B. J., Bach, B. R., Jr., & Yanke, A. B. (2017). Inside-Out Versus All-Inside Repair of Isolated Meniscal Tears:

- An Updated Systematic Review. *Am J Sports Med*, 45(1), 234-242.  
doi:10.1177/0363546516632504
- Fink, C., Lawton, R., Förschner, F., Gföller, P., Herbort, M., & Hoser, C. (2018). Minimally Invasive Quadriceps Tendon Single-Bundle, Arthroscopic, Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Rectangular Bone Tunnels. *Arthrosc Tech*, 7(10), e1045-e1056.  
doi:10.1016/j.eats.2018.06.012
- Forkel, P., Herbort, M., Schulze, M., Rosenbaum, D., Kirstein, L., Raschke, M., et al. (2013). Biomechanical consequences of a posterior root tear of the lateral meniscus: stabilizing effect of the meniscofemoral ligament. *Arch Orthop Trauma Surg*, 133(5), 621-626. doi:10.1007/s00402-013-1716-7
- Forkel, P., Reuter, S., Sprenger, F., Achtnich, A., Herbst, E., Imhoff, A., et al. (2015). Different patterns of lateral meniscus root tears in ACL injuries: application of a differentiated classification system. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 23(1), 112-118. doi:10.1007/s00167-014-3467-6
- Fox, A. J., Bedi, A., & Rodeo, S. A. (2012). The basic science of human knee menisci: structure, composition, and function. *Sports Health*, 4(4), 340-351. doi:10.1177/1941738111429419
- Fox, A. J., Wanivenhaus, F., Burge, A. J., Warren, R. F., & Rodeo, S. A. (2015). The human meniscus: a review of anatomy, function, injury, and advances in treatment. *Clin Anat*, 28(2), 269-287. doi:10.1002/ca.22456
- Grant, J. A., Wilde, J., Miller, B. S., & Bedi, A. (2012). Comparison of inside-out and all-inside techniques for the repair of isolated meniscal tears: a systematic review. *Am J Sports Med*, 40(2), 459-468.  
doi:10.1177/0363546511411701
- Grassi, A., Pizza, N., Andrea Lucidi, G., Macchiarola, L., Mosca, M., & Zaffagnini, S. (2021). Anatomy, magnetic resonance and arthroscopy of the popliteal hiatus of the knee: normal aspect and pathological conditions. *EFORT Open Rev*, 6(1), 61-74. doi:10.1302/2058-5241.6.200089
- Hefti, F., Müller, W., Jakob, R. P., & Stäubli, H. U. (1993). Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 1(3-4), 226-234. doi:10.1007/bf01560215

- Hinman, R. S., May, R. L., & Crossley, K. M. (2006). Is there an alternative to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment in osteoarthritis? *Arthritis Rheum*, 55(2), 306-313. doi:10.1002/art.21836
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*, 30(1), 1-15. doi:10.2165/00007256-200030010-00001
- Hoser, C., Fink, C., Brown, C., Reichkender, M., Hackl, W., & Bartlett, J. (2001). Long-term results of arthroscopic partial lateral meniscectomy in knees without associated damage. *J Bone Joint Surg Br*, 83(4), 513-516. doi:10.1302/0301-620x.83b4.11364
- Irrgang, J. J., Anderson, A. F., Boland, A. L., Harner, C. D., Kurosaka, M., Neyret, P., et al. (2001). Development and validation of the international knee documentation committee subjective knee form. *Am J Sports Med*, 29(5), 600-613. doi:10.1177/03635465010290051301
- Jagodzynski, M., Müller, W., & Friederich, N. (2016). Rotation. In: Jagodzinski M, Friederich N, Müller W, eds. . *Das Knie. Vol 2. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg*., 59-90.
- Johannsen, A. M., Civitarese, D. M., Padalecki, J. R., Goldsmith, M. T., Wijdicks, C. A., & LaPrade, R. F. (2012). Qualitative and quantitative anatomic analysis of the posterior root attachments of the medial and lateral menisci. *Am J Sports Med*, 40(10), 2342-2347. doi:10.1177/0363546512457642
- Karpinski, K., Diermeier, T., Willinger, L., Imhoff, A. B., Achtnich, A., & Petersen, W. (2019). No dynamic extrusion of the medial meniscus in ultrasound examination in patients with confirmed root tear lesion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 27(10), 3311-3317. doi:10.1007/s00167-018-5341-4
- Kawashima, I., Hiraiwa, H., Ishizuka, S., Kawai, R., Kusaka, Y., Ohtomo, K., et al. (2020). Incidence of Medial and Lateral Meniscal Tears After Delayed Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Pediatric Patients. *Orthop J Sports Med*, 8(11), 2325967120964603. doi:10.1177/2325967120964603
- Koga, H., Nakamae, A., Shima, Y., Iwasa, J., Myklebust, G., Engebretsen, L., et al. (2010). Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball

- and basketball. *Am J Sports Med*, 38(11), 2218-2225.  
doi:10.1177/0363546510373570
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med*, 15(2), 155-163. doi:10.1016/j.jcm.2016.02.012
- Kopf, S., Beaufils, P., Hirschmann, M. T., Rotigliano, N., Ollivier, M., Pereira, H., et al. (2020). Management of traumatic meniscus tears: the 2019 ESSKA meniscus consensus. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 28(4), 1177-1194. doi:10.1007/s00167-020-05847-3
- Lakens, D. (2017). Equivalence Tests: A Practical Primer for t Tests, Correlations, and Meta-Analyses. *Soc Psychol Personal Sci*, 8(4), 355-362. doi:10.1177/1948550617697177
- LaPrade, C. M., Ellman, M. B., Rasmussen, M. T., James, E. W., Wijdicks, C. A., Engebretsen, L., et al. (2014). Anatomy of the anterior root attachments of the medial and lateral menisci: a quantitative analysis. *Am J Sports Med*, 42(10), 2386-2392. doi:10.1177/0363546514544678
- Masouros, S. D., McDermott, I. D., Amis, A. A., & Bull, A. M. (2008). Biomechanics of the meniscus-meniscal ligament construct of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 16(12), 1121-1132. doi:10.1007/s00167-008-0616-9
- McDermott, I. D., & Amis, A. A. (2006). The consequences of meniscectomy. *J Bone Joint Surg Br*, 88(12), 1549-1556. doi:10.1302/0301-620x.88b12.18140
- McNicholas, M. J., Rowley, D. I., McGurty, D., Adalberth, T., Abdon, P., Lindstrand, A., et al. (2000). Total meniscectomy in adolescence. A thirty-year follow-up. *J Bone Joint Surg Br*, 82(2), 217-221.
- Musahl, V., Citak, M., O'Loughlin, P. F., Choi, D., Bedi, A., & Pearle, A. D. (2010). The effect of medial versus lateral meniscectomy on the stability of the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med*, 38(8), 1591-1597. doi:10.1177/0363546510364402
- Navali, A. M., Bahari, L. A., & Nazari, B. (2012). A comparative assessment of alternatives to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol*, 4(1), 40. doi:10.1186/1758-2555-4-40

- Nawabi, D. H., Cro, S., Hamid, I. P., & Williams, A. (2014). Return to play after lateral meniscectomy compared with medial meniscectomy in elite professional soccer players. *Am J Sports Med*, *42*(9), 2193-2198. doi:10.1177/0363546514540271
- Nelson, E. W., & LaPrade, R. F. (2000). The anterior intermeniscal ligament of the knee. An anatomic study. *Am J Sports Med*, *28*(1), 74-76. doi:10.1177/03635465000280012401
- Nepple, J. J., Dunn, W. R., & Wright, R. W. (2012). Meniscal repair outcomes at greater than five years: a systematic literature review and meta-analysis. *J Bone Joint Surg Am*, *94*(24), 2222-2227. doi:10.2106/jbjs.K.01584
- Novaretti, J. V., Lian, J., Patel, N. K., Chan, C. K., Cohen, M., Musahl, V., et al. (2020). Partial Lateral Meniscectomy Affects Knee Stability Even in Anterior Cruciate Ligament-Intact Knees. *J Bone Joint Surg Am*, *102*(7), 567-573. doi:10.2106/jbjs.19.00712
- Ode, G. E., Van Thiel, G. S., McArthur, S. A., Dishkin-Paset, J., Leurgans, S. E., Shewman, E. F., et al. (2012). Effects of serial sectioning and repair of radial tears in the lateral meniscus. *Am J Sports Med*, *40*(8), 1863-1870. doi:10.1177/0363546512453291
- Ouanezar, H., Blakeney, W. G., Latrobe, C., Saithna, A., Fernandes, L. R., Delaloye, J. R., et al. (2018). The popliteus tendon provides a safe and reliable location for all-inside meniscal repair device placement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, *26*(12), 3611-3619. doi:10.1007/s00167-018-4889-3
- Parker, B. R., Hurwitz, S., Spang, J., Creighton, R., & Kamath, G. (2016). Surgical Trends in the Treatment of Meniscal Tears: Analysis of Data From the American Board of Orthopaedic Surgery Certification Examination Database. *Am J Sports Med*, *44*(7), 1717-1723. doi:10.1177/0363546516638082
- Parsons, C., Fuggle, N. R., Edwards, M. H., Goulston, L., Litwic, A. E., Jagannath, D., et al. (2018). Concordance between clinical and radiographic evaluations of knee osteoarthritis. *Aging Clin Exp Res*, *30*(1), 17-25. doi:10.1007/s40520-017-0847-z
- Patel, R., Eltgroth, M., Souza, R., Zhang, C. A., Majumdar, S., Link, T. M., et al. (2016). Loaded versus unloaded magnetic resonance imaging (MRI) of

- the knee: Effect on meniscus extrusion in healthy volunteers and patients with osteoarthritis. *Eur J Radiol Open*, 3, 100-107.  
doi:10.1016/j.ejro.2016.05.002
- Paxton, E. S., Stock, M. V., & Brophy, R. H. (2011). Meniscal repair versus partial meniscectomy: a systematic review comparing reoperation rates and clinical outcomes. *Arthroscopy*, 27(9), 1275-1288.  
doi:10.1016/j.arthro.2011.03.088
- Petersen, W., & Tillmann, B. (1998). Collagenous fibril texture of the human knee joint menisci. *Anat Embryol (Berl)*, 197(4), 317-324.  
doi:10.1007/s004290050141
- Reisner, J. H., Franco, J. M., Hollman, J. H., Johnson, A. C., Sellon, J. L., & Finnoff, J. T. (2020). Ultrasound Assessment of Weight-Bearing and Non-Weight-Bearing Meniscal Extrusion: A Reliability Study. *Pm r*, 12(1), 26-35. doi:10.1002/pmrj.12183
- Riecke, B. F., Christensen, R., Torp-Pedersen, S., Boesen, M., Gudbergesen, H., & Bliddal, H. (2014). An ultrasound score for knee osteoarthritis: a cross-sectional validation study. *Osteoarthritis Cartilage*, 22(10), 1675-1691.  
doi:10.1016/j.joca.2014.06.020
- Ronnblad, E., Barenius, B., Engstrom, B., & Eriksson, K. (2020). Predictive Factors for Failure of Meniscal Repair: A Retrospective Dual-Center Analysis of 918 Consecutive Cases. *Orthop J Sports Med*, 8(3), 2325967120905529. doi:10.1177/2325967120905529
- Roos, E. M., Roos, H. P., Lohmander, L. S., Ekdahl, C., & Beynon, B. D. (1998). Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)--development of a self-administered outcome measure. *J Orthop Sports Phys Ther*, 28(2), 88-96. doi:10.2519/jospt.1998.28.2.88
- Rowland, G., Mar, D., McIlff, T., & Nelson, J. (2016). Evaluation of meniscal extrusion with posterior root disruption and repair using ultrasound. *Knee*, 23(4), 627-630. doi:10.1016/j.knee.2016.04.008
- Seedhom, B. B., & Hargreaves, D. J. (1979). Transmission of the Load in the Knee Joint with Special Reference to the Role of the Menisci:Part II: Experimental Results, Discussion and Conclusions. *Engineering in Medicine*, 8(4), 220-228. doi:10.1243/emed\_jour\_1979\_008\_051\_02

- Śmigielski, R., Becker, R., Zdanowicz, U., & Ciszek, B. (2015). Medial meniscus anatomy-from basic science to treatment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 23(1), 8-14. doi:10.1007/s00167-014-3476-5
- Stephen, J. M., Halewood, C., Kittl, C., Bollen, S. R., Williams, A., & Amis, A. A. (2016). Posteromedial Meniscocapsular Lesions Increase Tibiofemoral Joint Laxity With Anterior Cruciate Ligament Deficiency, and Their Repair Reduces Laxity. *Am J Sports Med*, 44(2), 400-408. doi:10.1177/0363546515617454
- Sutton, J. B. (1884). The Nature of Certain Ligaments. *J Anat Physiol*, 18(Pt 3), i2-238.
- Tang, X., Marshall, B., Wang, J. H., Zhu, J., Li, J., Smolinski, P., et al. (2019). Lateral Meniscal Posterior Root Repair With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Better Restores Knee Stability. *Am J Sports Med*, 47(1), 59-65. doi:10.1177/0363546518808004
- Tsujii, A., Yonetani, Y., Kinugasa, K., Matsuo, T., Yoneda, K., Ohori, T., et al. (2019). Outcomes More Than 2 Years After Meniscal Repair for Radial/Flap Tears of the Posterior Lateral Meniscus Combined With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med*, 47(12), 2888-2894. doi:10.1177/0363546519869955
- Verdonk, P., Depaepe, Y., Desmyter, S., De Muyenck, M., Almqvist, K. F., Verstraete, K., et al. (2004). Normal and transplanted lateral knee menisci: evaluation of extrusion using magnetic resonance imaging and ultrasound. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 12(5), 411-419. doi:10.1007/s00167-004-0500-1
- Walker, P. S., Arno, S., Bell, C., Salvadore, G., Borukhov, I., & Oh, C. (2015). Function of the medial meniscus in force transmission and stability. *J Biomech*, 48(8), 1383-1388. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.02.055
- Westermann, R. W., Wright, R. W., Spindler, K. P., Huston, L. J., & Wolf, B. R. (2014). Meniscal repair with concurrent anterior cruciate ligament reconstruction: operative success and patient outcomes at 6-year follow-up. *Am J Sports Med*, 42(9), 2184-2192. doi:10.1177/0363546514536022
- Willinger, L., Lang, J. J., von Deimling, C., Diermeier, T., Petersen, W., Imhoff, A. B., et al. (2020). Varus alignment increases medial meniscus

- extrusion and peak contact pressure: a biomechanical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 28(4), 1092-1098. doi:10.1007/s00167-019-05701-1
- Winkler, P. W., Csapo, R., Wierer, G., Hepperger, C., Heinzle, B., Imhoff, A. B., et al. (2021). Sonographic evaluation of lateral meniscal extrusion: implementation and validation. *Arch Orthop Trauma Surg*, 141(2), 271-281. doi:10.1007/s00402-020-03683-1
- Winkler, P. W., Rothrauff, B. B., Buerba, R. A., Shah, N., Zaffagnini, S., Alexander, P., et al. (2020). Meniscal substitution, a developing and long-awaited demand. *J Exp Orthop*, 7(1), 55. doi:10.1186/s40634-020-00270-6
- Winkler, P. W., Wierer, G., Csapo, R., Hepperger, C., Heinzle, B., Imhoff, A. B., et al. (2020). Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair. *Orthop J Sports Med*, 8(4), 2325967120914568. doi:10.1177/2325967120914568
- Winkler, P. W., Zsidai, B., Wagala, N. N., Hughes, J. D., Horvath, A., Senorski, E. H., et al. (2021). Evolving evidence in the treatment of primary and recurrent posterior cruciate ligament injuries, part 1: anatomy, biomechanics and diagnostics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 29(3), 672-681. doi:10.1007/s00167-020-06357-y
- Zhang, F., Kumm, J., Svensson, F., Turkiewicz, A., Frobell, R., & Englund, M. (2016). Risk factors for meniscal body extrusion on MRI in subjects free of radiographic knee osteoarthritis: longitudinal data from the Osteoarthritis Initiative. *Osteoarthritis Cartilage*, 24(5), 801-806. doi:10.1016/j.joca.2015.12.003

## 15 Danksagung

Dieser Abschnitt gebührt all jenen Personen, ohne die die Umsetzung dieses Forschungsprojekts nicht möglich gewesen wäre.

Mein größter Dank geht an Univ.-Prof. Dr. Christian Fink und Univ.-Prof. Dr. Andreas B. Imhoff, welche mir die Durchführung dieses Projekts ermöglicht und anvertraut haben. Mit tatkräftiger Unterstützung haben sie mein Interesse in der Sportorthopädie sowie der medizinischen Wissenschaft geweckt und gefördert. Das gesamte Team der Praxis *Gelenkpunkt – Sport und Gelenkchirurgie Innsbruck* sowie der *Abteilung und Poliklinik für Sportorthopädie* waren mir jederzeit eine große Hilfe und ermöglichten die rasche und problemlose Umsetzung des Forschungsvorhabens, wofür ich meinen herzlichsten Dank aussprechen möchte.

Ein weiterer Dank gilt Dr. Caroline Hepperger und Priv.-Doz. Dr. Robert Csapo, welche mir in der Planung des Forschungsvorhabens, der statistischen Analyse sowie der Veröffentlichung der gewonnenen Ergebnisse unermüdlich zu Seite standen.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei dem Team der Medizinisch-Technischen-Assistenten der radiologischen Abteilung der *Privatklinik Hochrum – Sanatorium der Kreuzschwestern*, welche die Anfertigung der MRT Aufnahmen mit voller Begeisterung durchführten.

Zuletzt gilt mein tiefster Dank meinen Eltern, meinen Geschwistern und meiner Freundin, die mit großem Interesse mein Forschungsvorhaben verfolgten und mich zu jeder Zeit unterstützten und motivierten.

## **16 Anhang**

### **16.1 Veröffentlichung 1**

Winkler PW, Wierer G, Csapo R, Hepperger C, Heinzle B, Imhoff AB, Hoser C, Fink C. Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair. *Orthop J Sports Med.* 2020 Apr 10;8(4):2325967120914568. doi: 10.1177/2325967120914568. PMID: 32313812; PMCID: PMC7153201.

### **16.2 Veröffentlichung 2**

Winkler PW, Csapo R, Wierer G, Hepperger C, Heinzle B, Imhoff AB, Hoser C, Fink C. Sonographic evaluation of lateral meniscal extrusion: implementation and validation. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021 Feb;141(2):271-281. doi: 10.1007/s00402-020-03683-1. Epub 2020 Nov 20. PMID: 33215303; PMCID: PMC7886729.

### **16.3 Fragebogen zur Erhebung validierter Patient-Reported Outcome Scores**

### **16.4 IKDC – Formblatt zur Untersuchung des Kniegelenks**



# Quantitative Evaluation of Dynamic Lateral Meniscal Extrusion After Radial Tear Repair

Philipp W. Winkler,<sup>\*†</sup> MD, Guido Wierer,<sup>‡§</sup> MD, Robert Csapo,<sup>\*‡</sup> PhD, Assoc Prof, Caroline Hepperger,<sup>\*‡</sup>, Bernhard Heinzle,<sup>||</sup> MD, Andreas B. Imhoff,<sup>†</sup> MD, Prof, Christian Hoser,<sup>\*‡</sup> MD, Priv-Doz, and Christian Fink,<sup>\*‡¶</sup> MD, Prof

*Investigation performed at Sports and Joint Surgery, Gelenkpunkt, Innsbruck, Austria*

**Background:** Radial tears of the lateral meniscus frequently accompany acute anterior cruciate ligament (ACL) injuries and lead to increased joint stress and pathological meniscal extrusion (ME). The dynamic behavior of the lateral meniscus after radial tear repair with respect to ME has not been described.

**Purpose:** To quantitatively assess dynamic lateral ME after all-inside radial tear repair.

**Study Design:** Case series; Level of evidence, 4.

**Methods:** Patients who underwent ACL reconstruction and all-inside radial tear repair of the lateral meniscus and had no history of contralateral knee injuries were included. Magnetic resonance imaging scans were acquired in loaded (50% of body weight) and unloaded conditions of both the injured and noninjured knees. A custom-made pneumatically driven knee brace was used for standardized knee positioning in 10° of flexion and with axial load application. Quantitative measures included the absolute lateral ME, meniscal body extrusion ratio, and  $\Delta$  extrusion. Preoperative and postoperative unloaded extrusion data were compared by paired *t* tests. For postoperative data, the concomitant influence of the factors “leg” and “condition” were assessed through factorial analyses of variance.

**Results:** A total of 10 patients with a mean follow-up of 47.9 months were enrolled. The intraclass correlation coefficient (ICC) confirmed good interrater reliability (ICC, 0.898) and excellent intrarater reliability (ICC, 0.976). In the unloaded injured leg, all-inside repair reduced ME from  $3.15 \pm 1.07$  mm to  $2.13 \pm 0.61$  mm ( $-32.4\%$ ;  $P = .033$ ). Overall, load application led to a significant increase in ME ( $+0.34$  mm [ $+21.8\%$ ];  $P = .029$ ). Significantly greater ME was observed in the injured knee ( $+1.10$  mm [ $+93.2\%$ ];  $P = .001$ ) than in the noninjured knee. The condition  $\times$  leg interaction was not significant ( $P = .795$ ), suggesting that the compression-associated increase in ME did not differ significantly between the injured and noninjured knees.

**Conclusion:** Lateral ME depends on the knee status and loading condition. All-inside repair of radial meniscal tears led to a reduction of extrusion with no alteration in dynamic lateral ME. Meniscus-preserving therapy is recommended in the case of a radial lateral meniscal tear to preserve its dynamic behavior.

**Keywords:** dynamic meniscal extrusion; lateral meniscus; magnetic resonance imaging; radial tear; meniscal suture repair; stress MRI

The menisci play an important role in knee joint biomechanics. Because of their composition, morphology, and structural configuration, they are indispensable for proper knee functioning. In addition to decreasing tibiofemoral contact pressure and increasing contact area and congruency, they substantially contribute to load transmission, shock absorption, stability, nutrition, lubrication, and proprioception of the knee.<sup>19,35,38</sup> The incidence of meniscal tears associated with anterior cruciate ligament (ACL) lesions is as high as 79%, with the lateral meniscus being more frequently affected than the medial meniscus in acute circumstances.<sup>17,22,31</sup> Radial meniscal tears represent

approximately 15% of meniscal injuries and mainly affect the lateral meniscus.<sup>24,37</sup> For the combination of radial tears of the lateral meniscus and ACL lesions, an incidence of 5.4% has been reported.<sup>17</sup>

Under load-bearing conditions, axial force acting on the knee causes a radially oriented force vector because of the wedge-shaped appearance of the meniscus. The resulting force leads to radial displacement of the menisci, which is also known as meniscal extrusion (ME). Circumferentially oriented collagen fibers of the menisci prevent pathological extrusion by generating hoop stress.<sup>19,38</sup> These circumferential fibers run from the anterior to posterior root and are disrupted in the case of a radial tear, which leads to substantial impairment of meniscus function.<sup>28,38</sup> Injuries and degeneration of the meniscal substance and meniscus root tears are associated with significantly increased ME.<sup>14,30,33</sup>

The Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 8(4), 2325967120914568  
DOI: 10.1177/2325967120914568  
© The Author(s) 2020

This open-access article is published and distributed under the Creative Commons Attribution - NonCommercial - No Derivatives License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits the noncommercial use, distribution, and reproduction of the article in any medium, provided the original author and source are credited. You may not alter, transform, or build upon this article without the permission of the Author(s). For article reuse guidelines, please visit SAGE's website at <http://www.sagepub.com/journals-permissions>.

The degree of radial displacement depends on the severity and type of the meniscal lesion.<sup>28</sup> A radial meniscal tear results in ME, which leads to a significantly decreased contact area and increased contact pressure.<sup>41</sup> These biomechanical findings can be compared with the effect of partial or total meniscectomy.<sup>20</sup> Therefore, pathological ME is sometimes termed “functional meniscectomy.” The increased tibiofemoral contact pressure accelerates cartilage degeneration, resulting in a progressive development of knee joint osteoarthritis.<sup>5,29,49</sup>

Currently, no consensus exists regarding the optimal treatment of radial meniscal tears. Partial meniscectomy has become the most frequently performed orthopaedic surgery in the United States.<sup>21</sup> Hence, numerous studies have shown accelerated degenerative cartilage loss with the subsequent development of knee osteoarthritis,<sup>3,34,43,46</sup> particularly after lateral meniscectomy.<sup>27</sup> Comparative studies have suggested that meniscal repair techniques may yield superior clinical and radiological outcomes, especially at long-term follow-up.<sup>34,49</sup> For this reason, interest in meniscus-preserving treatment methods has increased in recent years. Because the biomechanical understanding of radial meniscal lesions is constantly improving, extensive research has focused on treatment options for this special tear pattern.<sup>2,12,13,23,39,45,47,51</sup>

The purpose of the present study was to quantitatively analyze dynamic lateral ME in patients undergoing ACL reconstruction and radial tear repair of the lateral meniscus. For this study, magnetic resonance imaging (MRI) was used in combination with a pneumatic knee brace to simulate normal weightbearing. In all patients, both knees were examined for a comparison of the injured knee with the noninjured contralateral knee. It was hypothesized that lateral ME would decrease after all-inside radial tear repair but still remain significantly higher in the injured knee than in the contralateral noninjured knee. Additionally, it was hypothesized that lateral ME would increase bilaterally after axial load application and that the dynamic behavior would not differ between the injured and noninjured knees after radial tear repair.

## METHODS

Patients who underwent ACL reconstruction and all-inside radial tear repair of the lateral meniscus were reviewed for eligibility. Selected patients had to visit the outpatient

clinic once for a detailed follow-up examination. The follow-up included obtaining patient history, recording patient-reported outcomes (PROs), conducting a clinical examination, and acquiring MRI scans. All examinations were performed on both knees. MRI scans were acquired with and without axial load application. Preoperative assessments were carried out retrospectively and included a standard clinical examination based on the International Knee Documentation Committee (IKDC) form, PRO measures, and MRI without axial knee loading.

Ethical permission was granted by the ethical review committee of the Medical University of Innsbruck in February 2018. Verbal and written consent for participation were obtained from all patients after providing detailed information about this project.

## Patient Selection and Surgical Technique

The database of our specialized orthopaedic surgery clinic was screened for patients treated for a traumatic ACL injury in combination with a radial tear of the posterior horn of the lateral meniscus between 2010 and 2017 using a 1-stage procedure. To be included in the study, patients had to meet the criteria for inclusion summarized in Table 1. For primary ACL reconstruction, quadriceps, hamstring, or patellar tendon autografts were used. Radial meniscal tear repair was performed by the all-inside suture technique using ULTRA FAST-FIX (Smith & Nephew). Depending on the tear size, 1 to 3 sutures were placed to secure meniscal damage. Only partial and complete tears resulting in arthroscopically confirmed instability of the lateral meniscus were repaired.

## Patient-Reported Outcomes

Patients were instructed to complete a questionnaire that was used to collect demographic data and included PRO measures and a visual analog scale (VAS) for pain. The PRO measures included the Lysholm score, Tegner activity level (TAL), subjective IKDC form, and Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS). The TAL, Lysholm, and VAS for pain scores were collected preoperatively, 6 and 12 months postoperatively, and at the final follow-up. The KOOS and subjective IKDC scores were only acquired at the final follow-up.

\*Address correspondence to Christian Fink, MD, Prof, Sports and Joint Surgery, Gelenkpunkt, Olympiastraße 39, 6020 Innsbruck, Austria (email: c.fink@gelenkpunkt.com).

\*Sports and Joint Surgery, Gelenkpunkt, Innsbruck, Austria.

†Department of Orthopaedic Sports Medicine, Klinikum Rechts der Isar, Technical University of Munich, Munich, Germany.

‡Research Unit for Orthopaedic Sports Medicine and Injury Prevention, Institute of Sports Medicine, Alpine Medicine and Health Tourism, University of Health Sciences, Medical Informatics and Technology, Hall in Tirol, Austria.

§Department of Orthopaedics and Traumatology, Paracelsus Medical University, Salzburg, Austria.

||Department of Radiology, MRT-CT Diagnostics, Wörgl, Austria.

Final revision submitted December 9, 2019; accepted December 23, 2019.

One or more of the authors has declared the following potential conflict of interest or source of funding: A.B.I. has received consulting fees from Arthrosurface and Medi Bayreuth and royalties from Arthrex. C.F. has received consulting fees from Medacta and royalties from Karl Storz and Medacta. AOSSM checks author disclosures against the Open Payments Database (OPD). AOSSM has not conducted an independent investigation on the OPD and disclaims any liability or responsibility relating thereto.

Ethical approval of this study was obtained from the Ethikkommission der Medizinischen Universität Innsbruck (No. 1251/2017).

TABLE 1  
Inclusion and Exclusion Criteria<sup>a</sup>

Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
Minimum age at index surgery: 18 y	Horizontal, longitudinal, or complex meniscal tear
Maximum age at index surgery: 40 y	Partial meniscectomy
Primary ACL injury	Meniscus root tear
Radial tear of the posterior horn of the lateral meniscus	Radial tear limited to avascular zone 3 according to Arnoczky and Warren <sup>4</sup>
ACL reconstruction	Ipsilateral ACL or lateral meniscal reinjury
All-inside suture repair	Contralateral ACL, complex knee, or lateral meniscal injury
Minimum follow-up: 12 mo	

<sup>a</sup>ACL, anterior cruciate ligament.

### Clinical Examination

The clinical examination of the knee was based on the objective IKDC form. To avoid unnecessary radiation exposure with full-leg radiographs, the mechanical axis of the lower limb was assessed clinically. To quantify lower limb alignment, the caliper and goniometer methods described by Navali et al<sup>40</sup> and Hinman et al<sup>25</sup> were used. To evaluate the meniscal status, several tests including palpation of the joint line, the McMurray test, and the Thessaly test<sup>7</sup> were performed.

### Magnetic Resonance Imaging

MRI scans of both knees were acquired using a MAGNETOM Skyra 3.0-T MRI scanner (Siemens Healthineers). The MRI protocol included the following sequences: coronal, sagittal, and axial fat-suppressed proton density-weighted turbo spin echo for both conditions. The following parameters were used for imaging acquisition: coronal (repetition time/echo time [TR/TE] = 4330/30 ms; field of view [FOV] = 130 × 130 mm; slice thickness = 2 mm), sagittal (TR/TE = 2610/30 ms; FOV = 130 × 130 mm; slice thickness = 2 mm), and axial (TR/TE = 1950/29 ms; FOV = 150 × 150 mm; slice thickness = 2 mm). An MRI-compatible custom-made pneumatic knee brace (Ergospect) was used for standardized patient positioning and axial load application (Figure 1). Neutral rotation of the lower leg and 10° of knee flexion in a supine position were standard for imaging acquisition. The MRI examination started with the healthy knee, followed by the operated knee. First, scans were acquired in the unloaded condition. By using a pneumatic system within the knee brace, an axial force was then applied to induce stress equivalent to that caused by 50% of the patient's body weight acting on the knee joint in an upright stance. After imaging acquisition, the pneumatic knee brace was placed on the contralateral knee to repeat the process.

Preoperative scans were only available in the unloaded condition. Therefore, the preoperative data were compared

with the corresponding postoperative values of the operated unloaded knee.

### Imaging Analyses

All MRI scans were analyzed by 2 experienced orthopaedic surgeons (P.W.W., G.W.) in collaboration with a musculoskeletal radiologist (B.H.). The 2 observers were blinded to the imaging acquisition conditions and assessed all MRI scans twice with 2 weeks between each assessment. For imaging evaluations and measurements, the free medical image viewer Horos version 3.3.5 (<https://horosproject.org>) was used.

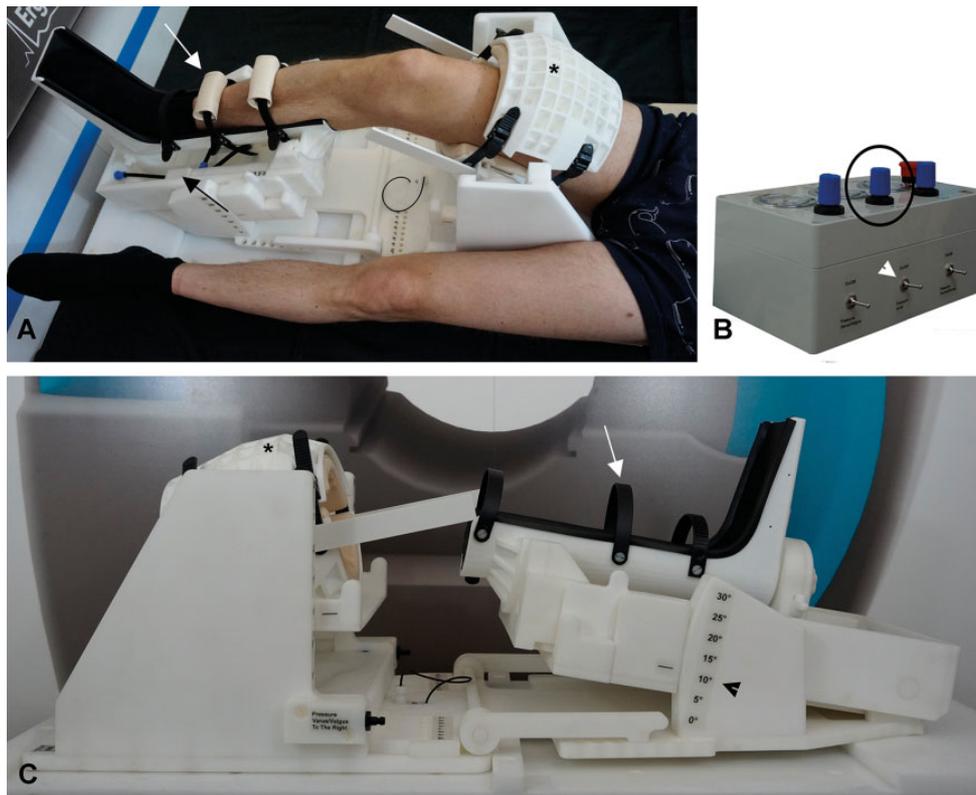
Using the coronal slice in which the femoral attachment of the popliteal tendon was best visible, lateral ME was measured as the horizontal distance between the most external margin of the tibial plateau articular cartilage and the peripheral border of the lateral meniscus (Figure 2).<sup>11,42</sup> The subchondral tibial plateau width (TW) was measured in the same layer and defined as the subchondral distance between the medial and lateral cartilage-bone transition. Using these values, the meniscus body extrusion ratio (MBER), which relates ME to the knee size,<sup>52</sup> was calculated as ME/TW and expressed as a percentage. The difference in ME between the loaded and unloaded conditions ( $\Delta$  extrusion)<sup>30</sup> was calculated for further analysis. Additionally, the MRI scans were reviewed for the presence of meniscofemoral ligaments (MFLs).

### Statistical Analyses

Data analysis was performed by using SPSS Statistics software (Version 25.0, IBM). The level of significance for all statistical tests was set to .05.

To assess interrater reliability, all measurements of ME obtained before and after surgery, as well as in the unloaded and loaded conditions, were pooled (total n = 92) and compared between the 2 raters by means of a paired-samples *t* test. In addition, the intraclass correlation coefficient (ICC) was calculated using a 2-way random-effects model to quantify absolute agreement in the measurements.<sup>32</sup> The typical error of measurement was calculated by dividing the standard deviation of the differences in scores by the square root of 2.<sup>26</sup> Correlation and Bland-Altman plots were created for visual inspection of agreement in the ratings. For test-retest (intrarater) reliability of data analysis, all MRI scans were reanalyzed by the main examiner (P.W.W.), and the ICC was calculated using a 2-way mixed-effects model.<sup>32</sup> Further reliability statistics were calculated as for the interrater reliability analyses.

The efficacy of the treatment was evaluated through the statistical comparison of preoperative and postoperative data of ME and the respective MBER by means of paired-samples *t* tests. In addition, 2 × 2 factorial analysis of variance was used to analyze the effects of the factors "condition" (unloaded vs loaded) and "leg" (injured vs non-injured), as well as possible condition × leg interactions in the postoperative results. To analyze dynamic lateral ME,  $\Delta$  extrusion was calculated for the healthy and injured knees and compared using a paired *t* test. For all significant



**Figure 1.** Magnetic resonance imaging-compatible pneumatic knee brace. (A) Knee fixed in the pneumatic brace. (B) Control panel. (C) Pneumatic knee brace from a lateral view. Asterisk = femoral fixation; white arrow = tibial fixation; black arrow = axial pneumatic cylinder; black arrowhead = flexion scale ( $10^\circ$  in this case); white arrowhead = on/off switch of the pneumatic system; black circle = pneumatic pressure regulator.

effects, the Cohen  $d$  was calculated through  $t$  conversion,<sup>16</sup> converted to Pearson  $r$ , and reported as measurements of effect sizes.

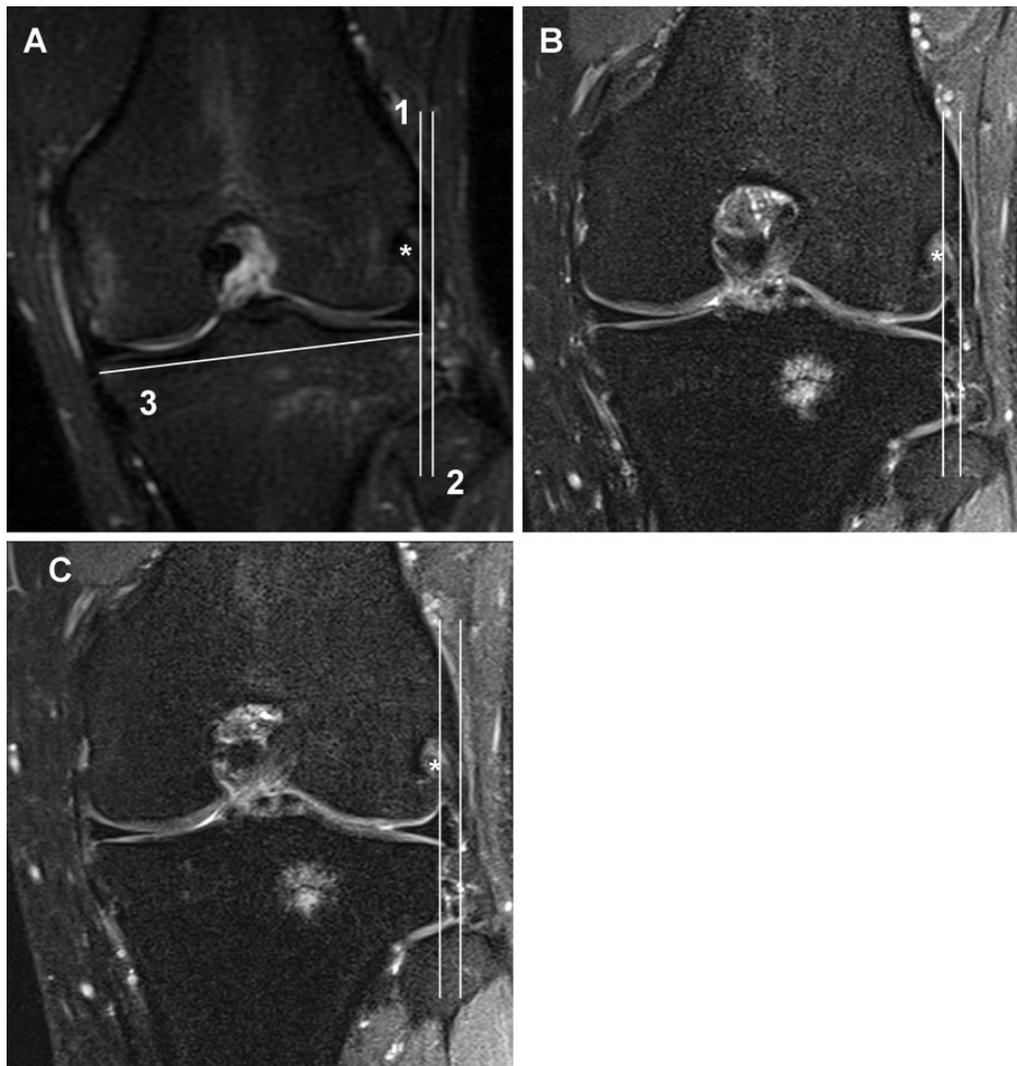
## RESULTS

A total of 10 patients (9 male, 1 female) with a mean age of  $25.30 \pm 5.85$  years at the time of surgery were included in this study. The mean body mass index was  $22.98 \pm 1.94$  kg/m<sup>2</sup>. The mean time from injury to surgery was 6.9 days (range, 0-32 days), and the mean time from surgery to the final follow-up was 47.9 months (range, 12-87 months). For ACL reconstruction, the hamstring, quadriceps, and patellar tendon were used in 7 patients, 2 patients, and 1 patient, respectively. None of the meniscal tears affected the posterior root of the lateral meniscus. Moreover, 60% of the patients had a partial radial tear (>50% of the meniscal substance involved), whereas 40% had complete radial disruption of the posterior horn of the lateral meniscus. Also, 1 suture was applied in 6 patients, 2 sutures were applied in 3 patients, and 3 sutures were applied in 1 patient for radial tear repair. Radiological signs of radial tears could be found in 3 patients on postoperative MRI, although there was no confirmation of persistent lateral meniscal radial tears based on second-look arthroscopic surgery,

as there were no clinical signs or symptoms. Additional lesions of the medial meniscus and medial collateral ligament were each observed in 2 patients. During arthroscopic surgery, a grade 2 chondral lesion, according to the International Cartilage Repair Society classification system,<sup>10</sup> was observed in the patellofemoral joint in 2 patients and in the medial compartment in 1 patient. In another patient, a grade 3 chondral lesion was detected in the medial compartment. The follow-up showed increasing tibiofemoral cartilage damage in 1 patient, whereas the others demonstrated consistent cartilage conditions. MRI scans revealed at least 1 MFL in 19 of 20 (95%) knees. The posterior MFL was present in 16 (80%) of the scanned knees, and the anterior MFL was present in 10 (50%). Both MFLs could be detected in 7 (35%) of the examined joints.

## Measurement Reliability

On average, the measurements of ME obtained by the 2 raters agreed closely ( $1.9 \pm 1.1$  mm [rater 1, P.W.W.] vs  $2.0 \pm 1.1$  mm [rater 2, G.W.]) and were not statistically significantly different ( $t[91] = -1.183$ ;  $P = .240$ ). The ICC suggested good absolute agreement of the ratings (ICC, 0.898 [95% CI, 0.846-0.933]). The typical error of measurement was 0.5 mm (Figure 3).



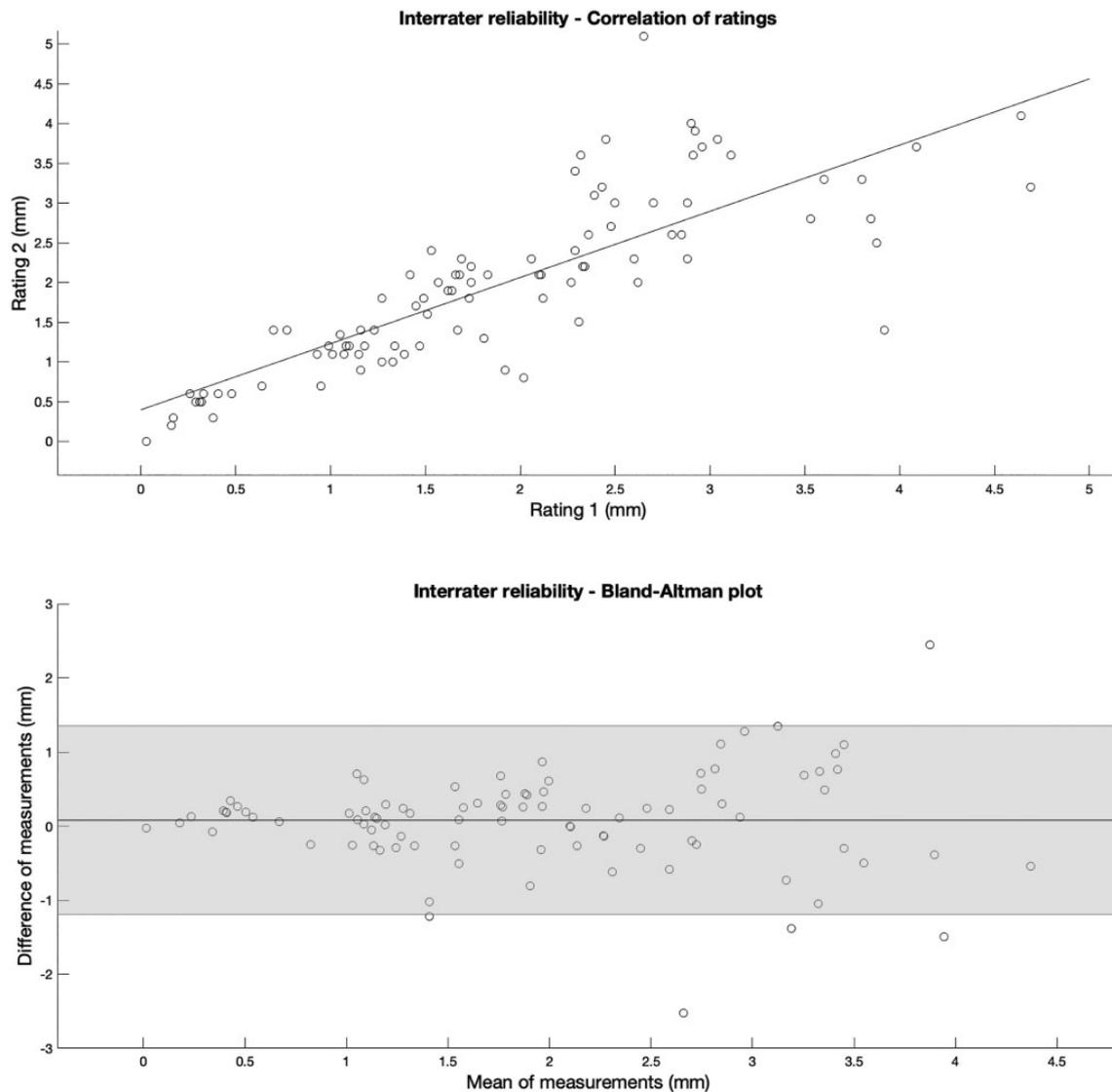
**Figure 2.** Lateral meniscal extrusion measurement. (A) Preoperative unloaded condition. (B) Postoperative unloaded condition. (C) Postoperative loaded condition. Asterisk = femoral attachment of the popliteal tendon; line 1 = vertical line running through the lateral tibial cartilage margin; line 2 = vertical line running through the most peripheral aspect of the lateral meniscus; line 3 = subchondral tibial plateau width; horizontal distance between lines 1 and 2 = absolute lateral meniscal extrusion.

The results obtained by rater 1 (P.W.W.) through repeated analyses of MRI scans differed by  $<0.1$  mm on average ( $1.9 \pm 1.1$  mm vs  $1.9 \pm 1.0$  mm, respectively;  $t[45] = 0.986$ ,  $P = .329$ ), and the difference was nonsignificant. Excellent reproducibility of imaging analysis was also confirmed by an ICC of 0.976 (95% CI, 0.957-0.987) and a typical error of measurement of 0.2 mm (Figure 4).

#### Lateral ME

In the unloaded injured leg, meniscal suture repair reduced ME from  $3.2 \pm 1.1$  mm preoperatively to  $2.1 \pm 0.6$  mm ( $-32.4\%$ ) at the final follow-up and the MBER from  $4.17 \pm 1.31$  to  $2.62 \pm 0.64$  ( $-37.2\%$ ), respectively. These changes were statistically significant and of moderate dimension (ME:  $t[5] = 2.916$ ;  $P = .033$ ;  $r = 0.21$ ) (MBER:  $t[5] = 3.335$ ;  $P = .021$ ;  $r = 0.57$ ). Analyses of postoperative ME

showed a significant effect of condition, ( $F[1,9] = 6.731$ ;  $P = .029$ ;  $r = 0.21$ ), with extrusion being greater by 0.3 mm ( $+21.8\%$ ) under compression (unloaded,  $1.6 \pm 0.9$  mm; loaded,  $1.9 \pm 1.1$  mm). Large differences were observed between legs: in the injured knee, ME was greater by 1.1 mm ( $+93.2\%$ ), reflecting a significant effect of the factor leg, ( $F[1,9] = 24.03$ ;  $P = .001$ ;  $r = 0.68$ ). The condition  $\times$  leg interaction was nonsignificant ( $F[1,9] = 0.072$ ;  $P = .795$ ), suggesting that the compression-associated increase in ME did not differ significantly between the injured and healthy knees. Analysis of the postoperative MBER showed similar results, with a significant effect of condition, ( $F[1,9] = 6.841$ ;  $P = .028$ ;  $r = 0.15$ ), and leg ( $F[1,9] = 25.888$ ;  $P = .001$ ;  $r = 0.54$ ) but no statistically significant condition  $\times$  leg interaction effect ( $F[1,9] = 0.077$ ;  $P = .787$ ). The mean values of ME and MBER depending on factors condition and leg are shown in Figure 5. Concerning dynamic behavior, mean  $\Delta$



**Figure 3.** Correlation and Bland-Altman plots of interrater reliability. The horizontal line and gray area in the Bland-Altman plot show the mean difference in ratings and the respective 95% CI.

extrusion of  $0.4 \pm 0.6$  mm and  $0.3 \pm 0.6$  mm were measured for the injured and healthy knees, respectively. Differences between legs were nonsignificant ( $t[18] = -0.264$ ;  $P = .795$ ). It has to be mentioned that the small sample size may have weakened the statistical power of these results.

### Clinical Findings and PROs

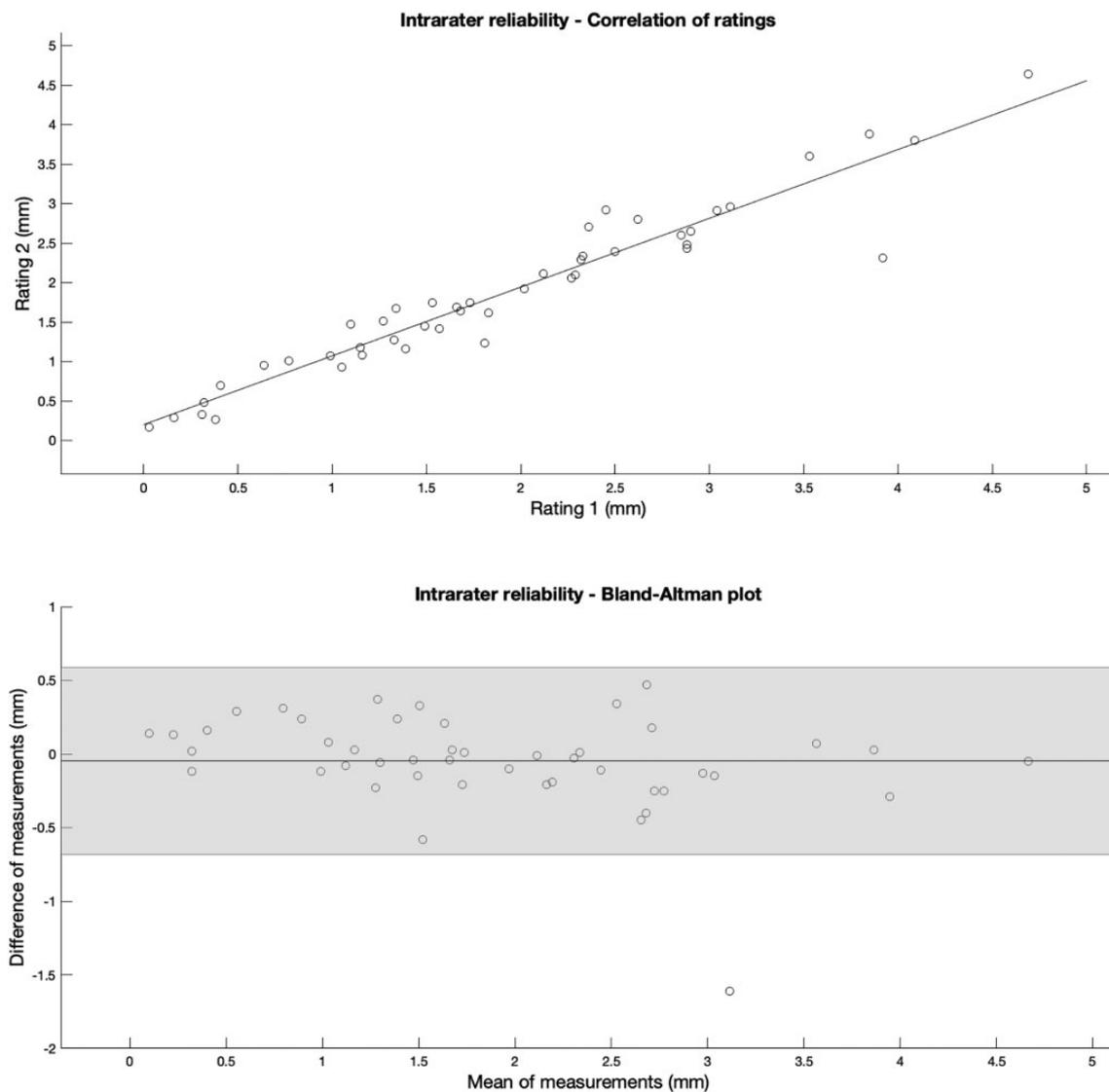
There were 2 patients who reported temporary blocking symptoms, and another 2 patients described pain during prolonged squatting. None of the participants reported limitations in activities of daily living. All patients were satisfied with the outcome, and all but 1 patient were able to return to their previous recreational sports level. No severe malalignment of the lower limb was detected. The clinical examination revealed positive signs for the medial meniscus in 1 patient only. No additional

pathological abnormalities were observed. The PRO scores acquired over the follow-up period are summarized in Table 2.

### DISCUSSION

The most important findings of the present study are that lateral ME (1) decreased significantly after all-inside radial tear repair, (2) increased significantly (+21.8%) after load application, and (3) showed significantly higher values in the injured knee than in the noninjured knee. The nonsignificant difference in  $\Delta$  extrusion between the healthy and injured knees suggests intact load acceptance behavior after lateral meniscal radial tear repair.

The high incidence of lateral meniscal tears associated with ACL injuries and the associated changes in knee joint biomechanics have led to increasing interest in meniscus-

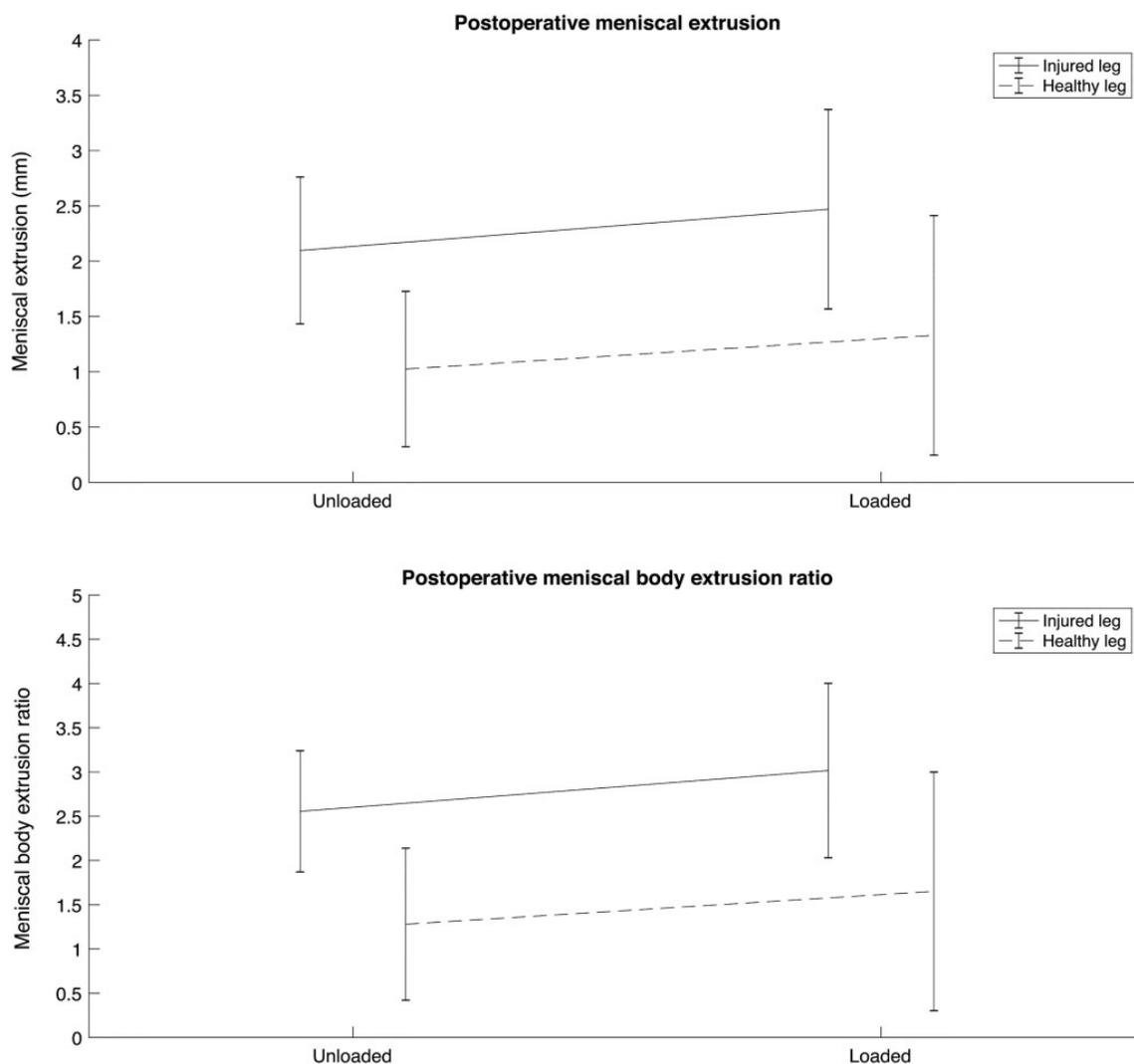


**Figure 4.** Correlation and Bland-Altman plots of intrarater reliability. The horizontal line and gray area in the Bland-Altman plot show the mean difference in ratings and the respective 95% CI.

preserving therapies. Hagino et al<sup>22</sup> observed concomitant meniscal lesions in 79.2% of ACL-deficient knees. Tears of the lateral meniscus have been reported to occur in 69.4% of acute ACL injuries. Similarly, Fetzer et al<sup>17</sup> detected more lateral meniscal lesions associated with ACL injuries than medial meniscal lesions, and radial tears accounted for >12% of the lateral meniscal lesions. Clinical research has indicated that radial tears account for 14% to 15% of all meniscal lesions.<sup>24,37</sup> The high biomechanical effect of radial meniscal tears has been shown in 2 cadaveric studies.<sup>6,41</sup> Ode et al<sup>41</sup> detected significantly increased tibiofemoral contact pressure and a decreased contact area after radial transection of the lateral meniscus. In the same study, the mean tibiofemoral contact pressure after radial tear repair nearly reached that of an intact meniscus. According to Ode et al and Bedi et al,<sup>6</sup> therapies preserving the lateral meniscus after radial tears are of crucial

biomechanical importance. The present study was performed to provide in vivo human data reflecting the efficacy of radial tear repair of the lateral meniscus. To our knowledge, this is the first study to investigate this issue using stress MRI mimicking a physiological setting.

ME is also evident in healthy participants. Boxheimer et al<sup>8</sup> examined the changes in the meniscal position under different joint angles and loading conditions based on MRI of 22 asymptomatic volunteers. They detected radial displacement of the medial and lateral menisci in both the sagittal and coronal planes. The average extrusion in healthy volunteers was <3 mm and was more pronounced in the medial meniscus than in the lateral meniscus. Similar results were reported in clinical studies involving non-injured control groups.<sup>20,28,42</sup> In the present study, the mean radial displacement of the lateral meniscus under nonweightbearing conditions was  $1.0 \pm 0.7$  mm in the



**Figure 5.** Mean postoperative meniscal extrusion (top) and meniscal body extrusion ratio (bottom) as measured in the unloaded and loaded conditions in the injured and noninjured legs (healthy). Error bars represent standard deviations.

**TABLE 2**  
Patient-Reported Outcomes Before Injury, 6 and 12 Months Postoperatively, and at Last Follow-up<sup>a</sup>

Measure	Before Injury	6 mo	12 mo	Last Follow-up
VAS for pain	0.7 ± 1.34	1.0 ± 1.00	1.3 ± 1.21	0.6 ± 0.84
Lysholm	92.2 ± 18.60	89.8 ± 7.79	88.3 ± 9.85	91.4 ± 7.89
Subjective IKDC	—	—	—	91.4 ± 6.71
KOOS Pain	—	—	—	95.6 ± 3.97
KOOS Symptoms	—	—	—	88.9 ± 10.44
KOOS Activities of Daily Living	—	—	—	99.6 ± 0.71
KOOS Sports and Recreation	—	—	—	94.5 ± 6.43
KOOS Quality of Life	—	—	—	80.6 ± 16.78
TAL, median (range)	7 (6-10)	6 (4-10)	6 (1-9)	6 (6-9)

<sup>a</sup>Data are shown as mean ± SD unless otherwise indicated. Dashes signify not reported. IKDC, International Knee Documentation Committee; KOOS, Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score; TAL, Tegner activity level; VAS, visual analog scale.

noninjured knee and  $2.1 \pm 0.6$  mm in the injured knee. A threshold of 3 mm is often used to distinguish between physiological and pathological extrusion.<sup>20,28,36</sup> At higher levels of extrusion, the meniscus is considered functionally ineffective. It should be noted, however, that physiological extrusion of menisci depends on several parameters, such as age and body mass index,<sup>1,15</sup> and may be completely reversible.<sup>15</sup> Therefore, the current fixed cut-off value is problematic. Consequently, no threshold value for pathological extrusion was defined in the present study. Extrusion of the healthy contralateral side served as a reference and was compared with that of the operated side.

The upright bipedal posture causes each knee joint to be loaded with approximately 50% of a patient's body weight. Because of the composition and cross section of the meniscus, this axial force leads to a change in its position. The increase of ME in a loaded condition is defined as dynamic ME.<sup>1,15,30</sup> Thus, in contrast to standard MRI, the application of different loading conditions allows for ME to be studied under conditions that are similar to physiological demands. Numerous studies have shown a significant increase in radial displacement of the menisci when an axial load is applied to the joint.<sup>1,8,15,42</sup> However, few studies have dynamically investigated ME with the use of MRI.<sup>8,9,42,48</sup> These investigations, however, have shown some limitations regarding the reproducibility of knee positioning and consistent load application. In the present study, a newly designed nonferromagnetic pneumatic knee brace was used for standard leg positioning and load application during MRI. Using the control panel, it was possible to apply precisely 50% of the body weight as an axial force via the pneumatic system. Based on this method, a significant increase in ME from  $1.6 \pm 0.9$  mm to  $1.9 \pm 1.1$  mm (+21.8%;  $P = .029$ ) was induced with load application.

Several studies have indicated the dynamic behavior of the menisci.<sup>1,8,9,15,30,42,48,50</sup> A recent study showed that the dynamic increase of medial ME is significantly compromised in the presence of a complete medial root tear compared with the healthy state (mean  $\Delta$  extrusion,  $0.1 \pm 0.2$  mm [study group] vs  $1.0 \pm 0.4$  mm [control group]).<sup>30</sup> This phenomenon is called the "dead meniscus sign"<sup>30</sup> and may be attributable to an interruption in the ring structure and potentially associated impairment of the viscoelasticity of meniscal tissue. In the present study, the difference in the mean  $\Delta$  extrusion between the healthy ( $0.3 \pm 0.6$  mm) and injured ( $0.4 \pm 0.6$  mm) knees was small and statistically nonsignificant ( $P = .795$ ). Moreover, the condition  $\times$  leg interaction was nonsignificant, suggesting that the compression-associated increase in ME did not differ significantly between the injured and healthy knees. It is therefore assumed that the dynamic behavior of the lateral meniscus is still maintained after radial tear repair. Mean lateral ME under nonweightbearing conditions was  $1.0 \pm 0.7$  mm and  $2.1 \pm 0.6$  mm for the noninjured and injured knee, respectively ( $t[9]$ , 2.262;  $P = .002$ ). For the weight-bearing conditions, mean lateral ME was  $1.3 \pm 1.1$  mm and  $2.5 \pm 0.9$  mm for the noninjured and injured knee, respectively ( $t[9]$ , 2.262;  $P = .002$ ).

Ichiba and Makuya<sup>28</sup> showed a significant progression of lateral ME from 1.8 mm preoperatively to 2.4 mm

postoperatively after ACL reconstruction. It should be mentioned that meniscus-preserving therapy was only performed in 3 of the 32 cases with concomitant meniscal lesions. The authors demonstrated that radial displacement of the lateral meniscus depends on the size and kind of the tear. In the present study, all-inside radial tear repair in the posterior horn of the lateral meniscus reduced unloaded ME by 32.4% (preoperative:  $3.2 \pm 1.1$  mm; postoperative:  $2.1 \pm 0.6$  mm). From a clinical point of view, this significant ( $P = .033$ ) finding represents a mean decrease of extrusion of 1.1 mm. However, it should be mentioned that excessive joint effusion in the acute condition at the time of preoperative MRI could temporarily increase ME because of increased intra-articular pressure.

Pula et al<sup>44</sup> detected  $0.5 \pm 0.72$  mm of lateral ME in patients with an isolated ACL injury compared with  $0.8 \pm 0.94$  mm in those with an additional posterior lateral meniscus root tear. This difference was not significant and may have been related to the occurrence of MFLs, which were arthroscopically confirmed in all patients. The presence of MFLs has a stabilizing effect on the lateral meniscus.<sup>18</sup> In this study, patients with posterior lateral meniscus root tears were excluded; thus, bias due to the described<sup>18</sup> stabilizing effect of the MFLs is unlikely.

## Limitations

The current study has some limitations. The small sample size may have weakened the statistical power of the results and, therefore, prevents generalization to large populations. The included injury pattern is rare, and the need for an unaffected contralateral knee resulted in the exclusion of many potential participants. Moreover, all preoperative MRI scans were acquired in a supine, unloaded position. Consequently, the comparison between preoperative and postoperative ME could only be performed in the conditions without axial load application. In addition, because of the small sample size, no correlation analysis could be performed regarding possible confounding factors, such as body mass index or pre-existing cartilage damage.

## CONCLUSION

In summary, the present study provided the following evidence:

- All-inside radial tear repair in the posterior horn of the lateral meniscus led to a significant reduction in lateral ME from preoperative levels.
- Loading the knee at 50% of the body weight led to a significant increase (+21.8%) in lateral ME.
- Irrespective of the loading condition, significantly higher values (+93.2%) of lateral ME were observed in the injured knee. However, the difference in  $\Delta$  extrusion between the healthy and injured knees was nonsignificant.

Based on these findings, we conclude that all-inside radial tear repair of the lateral meniscus may help to preserve the

dynamic behavior of the lateral meniscus, thus reducing biomechanical stress acting on the adjacent cartilage.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the support of CT and MRT Betreibergesellschaft Hochrum and the help of the radiology technicians at Privatklinik Hochrum.

## REFERENCES

- Achtnich A, Petersen W, Willinger L, et al. Medial meniscus extrusion increases with age and BMI and is depending on different loading conditions. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(8):2282-2288.
- Anderson L, Watts M, Shapter O, et al. Repair of radial tears and posterior horn detachments of the lateral meniscus: minimum 2-year follow-up. *Arthroscopy.* 2010;26(12):1625-1632.
- Andersson-Molina H, Karlsson H, Rockborn P. Arthroscopic partial and total meniscectomy: a long-term follow-up study with matched controls. *Arthroscopy.* 2002;18(2):183-189.
- Arnoczky SP, Warren RF. Microvasculature of the human meniscus. *Am J Sports Med.* 1982;10(2):90-95.
- Baratz ME, Fu FH, Mengato R. Meniscal tears: the effect of meniscectomy and of repair on intraarticular contact areas and stress in the human knee. A preliminary report. *Am J Sports Med.* 1986;14(4):270-275.
- Bedi A, Kelly N, Baad M, et al. Dynamic contact mechanics of radial tears of the lateral meniscus: implications for treatment. *Arthroscopy.* 2012;28(3):372-381.
- Blyth M, Anthony I, Francq B, et al. Diagnostic accuracy of the Thesaly test, standardised clinical history and other clinical examination tests (Apley's, McMurray's and joint line tenderness) for meniscal tears in comparison with magnetic resonance imaging diagnosis. *Health Technol Assess.* 2015;19(62):1-62.
- Boxheimer L, Lutz AM, Treiber K, et al. MR imaging of the knee: position related changes of the menisci in asymptomatic volunteers. *Invest Radiol.* 2004;39(5):254-263.
- Boxheimer L, Lutz AM, Zanetti M, et al. Characteristics of displaceable and nondisplaceable meniscal tears at kinematic MR imaging of the knee. *Radiology.* 2006;238(1):221-231.
- Braun S, Vogt S, Imhoff AB. Stage oriented surgical cartilage therapy: current situation [In German]. *Orthopade.* 2007;36(6):589-599, quiz 600.
- Brody JM, Lin HM, Hulstyn MJ, Tung GA. Lateral meniscus root tear and meniscus extrusion with anterior cruciate ligament tear. *Radiology.* 2006;239(3):805-810.
- Choi NH, Kim TH, Son KM, Victoroff BN. Meniscal repair for radial tears of the midbody of the lateral meniscus. *Am J Sports Med.* 2010;38(12):2472-2476.
- Cinque ME, Geeslin AG, Chahla J, Dornan GJ, LaPrade RF. Two-tunnel transligament repair of radial meniscus tears produces comparable results to inside-out repair of vertical meniscus tears. *Am J Sports Med.* 2017;45(10):2253-2259.
- Costa CR, Morrison WB, Carrino JA. Medial meniscus extrusion on knee MRI: is extent associated with severity of degeneration or type of tear? *AJR Am J Roentgenol.* 2004;183(1):17-23.
- Diermeier T, Beitzel K, Bachmann L, et al. Mountain ultramarathon results in temporary meniscus extrusion in healthy athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(8):2691-2697.
- Dunlap WP, Cortina JM, Vaslow JB, Burke MJ. Meta-analysis of experiments with matched groups or repeated measures designs. *Psychological Methods.* 1996;1(2):170-177.
- Fetzer GB, Spindler KP, Amendola A, et al. Potential market for new meniscus repair strategies: evaluation of the MOON cohort. *J Knee Surg.* 2009;22(3):180-186.
- Forkel P, Herbolt M, Schulze M, et al. Biomechanical consequences of a posterior root tear of the lateral meniscus: stabilizing effect of the meniscofemoral ligament. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2013;133(5):621-626.
- Fox AJ, Wanivenhaus F, Burge AJ, Warren RF, Rodeo SA. The human meniscus: a review of anatomy, function, injury, and advances in treatment. *Clin Anat.* 2015;28(2):269-287.
- Gale DR, Chaisson CE, Totterman SM, Schwartz RK, Gale ME, Felson D. Meniscal subluxation: association with osteoarthritis and joint space narrowing. *Osteoarthritis Cartilage.* 1999;7(6):526-532.
- Garrett WE Jr, Swiontkowski MF, Weinstein JN, et al. American Board of Orthopaedic Surgery Practice of the Orthopaedic Surgeon, part-II: certification examination case mix. *J Bone Joint Surg Am.* 2006;88(3):660-667.
- Hagino T, Ochiai S, Senga S, et al. Meniscal tears associated with anterior cruciate ligament injury. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2015;135(12):1701-1706.
- Haklar U, Kocaoglu B, Nalbantoglu U, Tuzuner T, Guven O. Arthroscopic repair of radial lateral meniscus [corrected] tear by double horizontal sutures with inside-outside technique. *Knee.* 2008;15(5):355-359.
- Harper KW, Helms CA, Lambert HS III, Higgins LD. Radial meniscal tears: significance, incidence, and MR appearance. *AJR Am J Roentgenol.* 2005;185(6):1429-1434.
- Hinman RS, May RL, Crossley KM. Is there an alternative to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment in osteoarthritis? *Arthritis Rheum.* 2006;55(2):306-313.
- Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med.* 2000;30(1):1-15.
- Hoser C, Fink C, Brown C, Reichkender M, Hackl W, Bartlett J. Long-term results of arthroscopic partial lateral meniscectomy in knees without associated damage. *J Bone Joint Surg Br.* 2001;83(4):513-516.
- Ichiba A, Makuya K. Radial displacement of the lateral meniscus before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2012;132(3):321-327.
- Jackson JP. Degenerative changes in the knee after meniscectomy. *Br Med J.* 1968;2(5604):525-527.
- Karpinski K, Diermeier T, Willinger L, Imhoff AB, Achtnich A, Petersen W. No dynamic extrusion of the medial meniscus in ultrasound examination in patients with confirmed root tear lesion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(10):3311-3317.
- Keene GC, Bickerstaff D, Rae PJ, Paterson RS. The natural history of meniscal tears in anterior cruciate ligament insufficiency. *Am J Sports Med.* 1993;21(5):672-679.
- Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *J Chiropr Med.* 2016;15(2):155-163.
- Lerer DB, Umans HR, Hu MX, Jones MH. The role of meniscal root pathology and radial meniscal tear in medial meniscal extrusion. *Skeletal Radiol.* 2004;33(10):569-574.
- Lutz C, Dalmay F, Ehkirch FP, et al. Meniscectomy versus meniscal repair: 10 years radiological and clinical results in vertical lesions in stable knee. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2015;101(8)(suppl):S327-S331.
- Maffulli N, Longo UG, Campi S, Denaro V. Meniscal tears. *Open Access J Sports Med.* 2010;1:45-54.
- Magee T. MR findings of meniscal extrusion correlated with arthroscopy. *J Magn Reson Imaging.* 2008;28(2):466-470.
- Magee T, Shapiro M, Williams D. MR accuracy and arthroscopic incidence of meniscal radial tears. *Skeletal Radiol.* 2002;31(12):686-689.
- Masouros SD, McDermott ID, Amis AA, Bull AM. Biomechanics of the meniscus-meniscal ligament construct of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2008;16(12):1121-1132.
- Moulton SG, Bhatia S, Civitarese DM, Frank RM, Dean CS, LaPrade RF. Surgical techniques and outcomes of repairing meniscal radial tears: a systematic review. *Arthroscopy.* 2016;32(9):1919-1925.

40. Navali AM, Bahari LA, Nazari B. A comparative assessment of alternatives to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol*. 2012;4(1):40.
41. Ode GE, Van Thiel GS, McArthur SA, et al. Effects of serial sectioning and repair of radial tears in the lateral meniscus. *Am J Sports Med*. 2012;40(8):1863-1870.
42. Patel R, Eltgroth M, Souza R, et al. Loaded versus unloaded magnetic resonance imaging (MRI) of the knee: effect on meniscus extrusion in healthy volunteers and patients with osteoarthritis. *Eur J Radiol Open*. 2016;3:100-107.
43. Petty CA, Lubowitz JH. Does arthroscopic partial meniscectomy result in knee osteoarthritis? A systematic review with a minimum of 8 years' follow-up. *Arthroscopy*. 2011;27(3):419-424.
44. Pula DA, Femia RE, Marzo JM, Bisson LJ. Are root avulsions of the lateral meniscus associated with extrusion at the time of acute anterior cruciate ligament injury? A case control study. *Am J Sports Med*. 2014;42(1):173-176.
45. Ra HJ, Ha JK, Jang SH, Lee DW, Kim JG. Arthroscopic inside-out repair of complete radial tears of the meniscus with a fibrin clot. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2013;21(9):2126-2130.
46. Salata MJ, Gibbs AE, Sekiya JK. A systematic review of clinical outcomes in patients undergoing meniscectomy. *Am J Sports Med*. 2010;38(9):1907-1916.
47. Song HS, Bae TY, Park BY, Shim J, In Y. Repair of a radial tear in the posterior horn of the lateral meniscus. *Knee*. 2014;21(6):1185-1190.
48. Stehling C, Souza RB, Hellio Le Graverand MP, et al. Loading of the knee during 3.0 T MRI is associated with significantly increased medial meniscus extrusion in mild and moderate osteoarthritis. *Eur J Radiol*. 2012;81(8):1839-1845.
49. Stein T, Mehling AP, Welsch F, von Eisenhart-Rothe R, Jager A. Long-term outcome after arthroscopic meniscal repair versus arthroscopic partial meniscectomy for traumatic meniscal tears. *Am J Sports Med*. 2010;38(8):1542-1548.
50. Vedi V, Williams A, Tennant SJ, Spouse E, Hunt DM, Gedroyc WM. Meniscal movement: an in-vivo study using dynamic MRI. *J Bone Joint Surg Br*. 1999;81(1):37-41.
51. Wu IT, Hevesi M, Desai VS, et al. Comparative outcomes of radial and bucket-handle meniscal tear repair: a propensity-matched analysis. *Am J Sports Med*. 2018;46(11):2653-2660.
52. Zhang F, Kumm J, Svensson F, Turkiewicz A, Frobell R, Englund M. Risk factors for meniscal body extrusion on MRI in subjects free of radiographic knee osteoarthritis: longitudinal data from the Osteoarthritis Initiative. *Osteoarthritis Cartilage*. 2016;24(5):801-806.



# Sonographic evaluation of lateral meniscal extrusion: implementation and validation

Philipp W. Winkler<sup>1,2</sup> · Robert Csapo<sup>1,3</sup> · Guido Wierer<sup>3,4</sup> · Caroline Hepperger<sup>1,3</sup> · Bernhard Heinzle<sup>5</sup> · Andreas B. Imhoff<sup>2</sup> · Christian Hoser<sup>1,3</sup> · Christian Fink<sup>1,3</sup>

Received: 9 February 2020 / Accepted: 4 November 2020  
© The Author(s) 2020

## Abstract

**Introduction** Meniscal extrusion (ME) is an important indicator of and prognostic factor for various knee pathologies. To date, no standardized protocol for the ultrasound-based examination of lateral ME exists. The purpose of the present study was to test the reliability and validity of lateral ME measurements using a standardized ultrasound-based examination protocol.

**Materials and Methods** A group consisting of 11 healthy volunteers (Group I, male and female, 18–45 years) as well as a group of 10 consecutive patients who had undergone all-inside lateral meniscal radial tear repair were included (Group II, male and female, 23–43 years). Lateral ME, the main outcome parameter, was measured by ultrasound (US; both groups) and magnetic resonance imaging (MRI; Group II only). Both knees of all subjects were examined in an unloaded state and under axial compression of the knee (50% of body weight). Repeated measurements obtained in Group I by 2 observers were used for reliability testing, and the validity of US was assessed through comparison with MRI data (Group II).

**Results** A total of 66 US images of Group I, obtained by each observer, were analyzed for reliability testing. Forty US and MR images of Group II were assessed for validation. Results showed good interrater (ICC = 0.904) and excellent intrarater (ICC = 0.942) reliability of US-based measurements of lateral ME. Agreement with MRI results was poor (ICC = 0.439), with US systematically overestimating results by 1.1 mm on average.

**Conclusions** Ultrasound is a reliable, quick and cost-effective technique for lateral ME measurement, but results are not readily comparable with MRI.

**Trial registration** The study was registered in the European Union Clinical Trials Register (EudraCT-Number: 2017-005037-24).

**Keywords** Lateral meniscal extrusion · Ultrasound · Stress MRI · Validation · Dynamic ultrasound · Dynamic extrusion

---

✉ Philipp W. Winkler  
ph.winkler@tum.de

Robert Csapo  
robert.csapo@umit.at

Guido Wierer  
wierer@gmail.com

Caroline Hepperger  
c.hepperger@gelenkpunkt.com

Bernhard Heinzle  
dr.heinzle@me.com

Andreas B. Imhoff  
imhoff@tum.de

Christian Hoser  
c.hoser@gelenkpunkt.com

Christian Fink  
c.fink@gelenkpunkt.com

<sup>1</sup> Gelenkpunkt, Sports- and Joint Surgery, Olympiastraße 39, 6020 Innsbruck, Austria

<sup>2</sup> Department for Orthopaedic Sports Medicine, Klinikum rechts der Isar, Technical University of Munich, Ismaninger Str. 22, 81675 Munich, Germany

<sup>3</sup> Research Unit for Orthopaedic Sports Medicine and Injury Prevention, Institute for Sports Medicine, Alpine Medicine and Health Tourism (ISAG), UMIT, Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, 6060 Hall in Tirol, Austria

<sup>4</sup> Department of Orthopedics and Traumatology, Paracelsus Medical University Salzburg, Müllner Hauptstraße 48, 5020 Salzburg, Austria

<sup>5</sup> Department of Radiology, MRT-CT Diagnostics Wörgl, Fritz-Atzl-Str. 8, 6300 Wörgl, Austria

## Abbreviations

FU	Follow-up
ICC	Intraclass correlation coefficient
LCL	Lateral collateral ligament
ME	Meniscal extrusion
MRI	Magnetic resonance imaging
PT	Popliteal tendon
TOST	Two one-sided <i>t</i> test
US	Ultrasound

## Introduction

Meniscal extrusion (ME) is defined as the radial displacement of meniscal tissue beyond the tibial margin and is caused by the triangular cross-section of the meniscus in response to axial load application [1]. Physiological extrusion occurs in both the medial [2–6] and lateral [4–7] meniscus. The amount of extrusion is influenced by several patient- and joint-related parameters. Increasing age or body mass index (BMI) [3, 8] as well as the presence of osteoarthritis [2, 5, 9–11] or meniscal tears [7, 8, 12] lead to higher levels of ME. In addition, prolonged periods of meniscus stress may cause a reversible increase in extrusion [13]. Hence, the limits of physiological ME are patient-specific and best determined through comparison with the (healthy) contralateral side, serving as a reference value.

Magnetic resonance imaging (MRI) is considered the gold standard for the assessment of ME [14]. However, MRI is expensive and not always readily available. Also, the acquisition of MR images may be time-consuming and complex. This particularly holds true for stress images, which require the use of special devices for load application [6, 11, 15]. In clinical practice, ME an indicator of various pathologies needs to be recorded quickly, simply and cost-effectively. One technique meeting these requirements is ultrasound (US), which allows for dynamic assessments and has been successfully used for measurements of medial ME in numerous studies [3, 10, 16–19].

The purpose of the present study was to determine the validity and reliability of US for ME measurements of the lateral meniscus under different loading conditions. Therefore, US images of the postero-lateral meniscus corner were acquired using a standardized protocol. Measurements of lateral ME were compared to MRI recordings and tested for intra- and interrater reliability. It was hypothesized that US-based measurements of lateral ME would be reliable and show results that are comparable to those obtained with MRI.

## Methods

Patient recruitment, examination, and data acquisition for this prospective study were performed between May 2018 and May 2019. Eleven healthy volunteers (Group I; male and female) aged between 18 and 45 years were enrolled for reliability testing. Subjects in Group I had no history of knee injury or surgery and a standard clinical examination of the knee revealed no pathologic findings. Additionally, ten consecutive patients presenting for a follow-up (FU) examination (minimum 12 months FU) after anterior cruciate ligament reconstruction and all-inside lateral meniscal radial tear repair were asked for participation for validity testing (Group II). Lateral ME measurement is of high interest in patients undergoing radial meniscal tear repair since a correlation between lateral ME and radial meniscal tear healing is assumed [15]. Both knees were examined in all subjects, so that data of 22 and 20 knees were available in Group I and Group II, respectively (Fig. 1). In both groups, neutral leg alignment, clinically assessed using the methods described by Navali et al. [20] and Hinman et al. [21], was required for participation. Clinical signs of knee joint osteoarthritis [22, 23] as well as obesity (BMI  $\geq 30$ ) were criteria for exclusion. Lateral ME, measured under two loading conditions using US (Group I and Group II) and MRI (Group II only), served as the main outcome parameter.

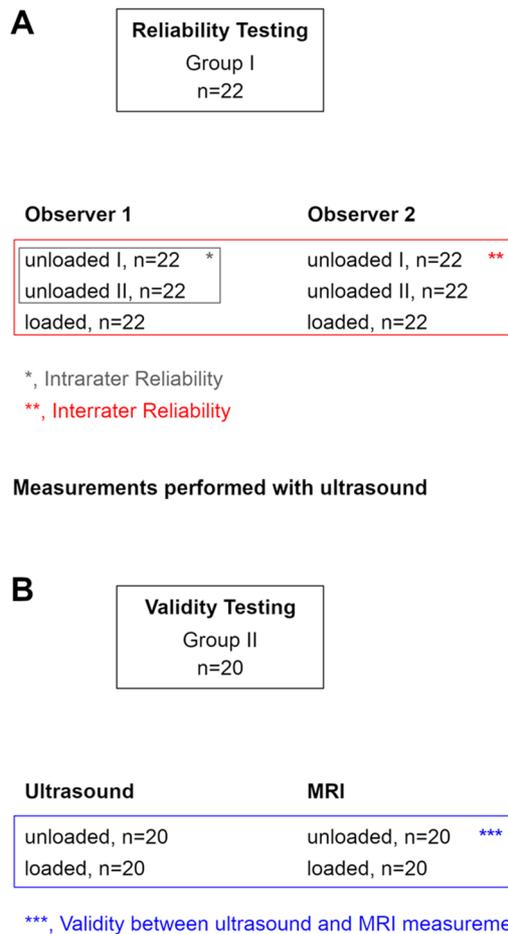
Each subject was informed in detail about the rationale for and procedures involved in the study, prior to obtaining written and verbal consent for participation. Informed consent was obtained from each subject. The study was approved by the ethical review board of the Medical University of Innsbruck in February 2018 and registered in the European Union Clinical Trials Register (EudraCT-Number: 2017-005037-24).

## Radiological assessment

Image acquisition and analyses were performed by two observers (P.W.W., R.C.) in collaboration with a trained musculoskeletal radiologist (B.H.). Both knees were studied in the unloaded state and after application of axial load equivalent to 50% of the individuals' body weight. Details of US and MR image acquisition and analyses are provided below.

## Ultrasound (US)

Sonographic evaluation of the postero-lateral meniscal corner was performed using a 5–10 MHz linear transducer in combination with the US unit Sonosite® MicroMaxx® (SonoSite, Inc., Bothell, WA, USA). Images were first



**Fig. 1** Group assignment. **a** Reliability testing based on Group I. Ultrasound (US) images were acquired twice in an unloaded condition and once in a loaded condition by each observer. Intrarater reliability testing was based on repeated measurements in the unloaded condition. Interrater reliability testing was based on measurements taken by each observer in the unloaded and loaded condition. “n” represents the number of images acquired by each observer in the respective loading condition. **b** Validity testing based on Group II. US and MRI images were acquired in both knees of all subjects in the unloaded and loaded condition. “n” represents the number of images acquired for each imaging modality in the respective loading condition

acquired in the supine position (unloaded condition) and then in bipedal stance (loaded condition). 10° of knee flexion and 0° of tibia rotation were standard for examination. The optimal transducer position for ME measurement was located in the supine condition and marked to ensure consistent transducer positioning under both loading conditions. US images in the unloaded condition were acquired twice by each observer to determine test–retest reliability. US images in the loaded, standing condition were acquired once by each observer.

To our knowledge, no standardized US examination protocol for lateral ME measurements has been published yet.

Therefore, the following approach was adopted to warrant consistency (Fig. 2). First, the fibula head and fibula attachment of the lateral collateral ligament (LCL) were located in the longitudinal plane. Then, the probe was shifted proximally along with the LCL until its femoral attachment appeared in the field of view. In this position, the probe was first pivoted to visualize the femoral origin of the popliteal tendon (PT) and then shifted centrally to the tibiofemoral joint line. With the probe held perpendicular to the joint plane and the tibial cortical rim, the orientation of the probe was slightly adjusted for optimal visualization of the distal lateral femur in combination with the PT, the proximal lateral tibial condyle, and the lateral meniscus in between. This final image was used for ME measurements.

### Magnetic resonance imaging (MRI)

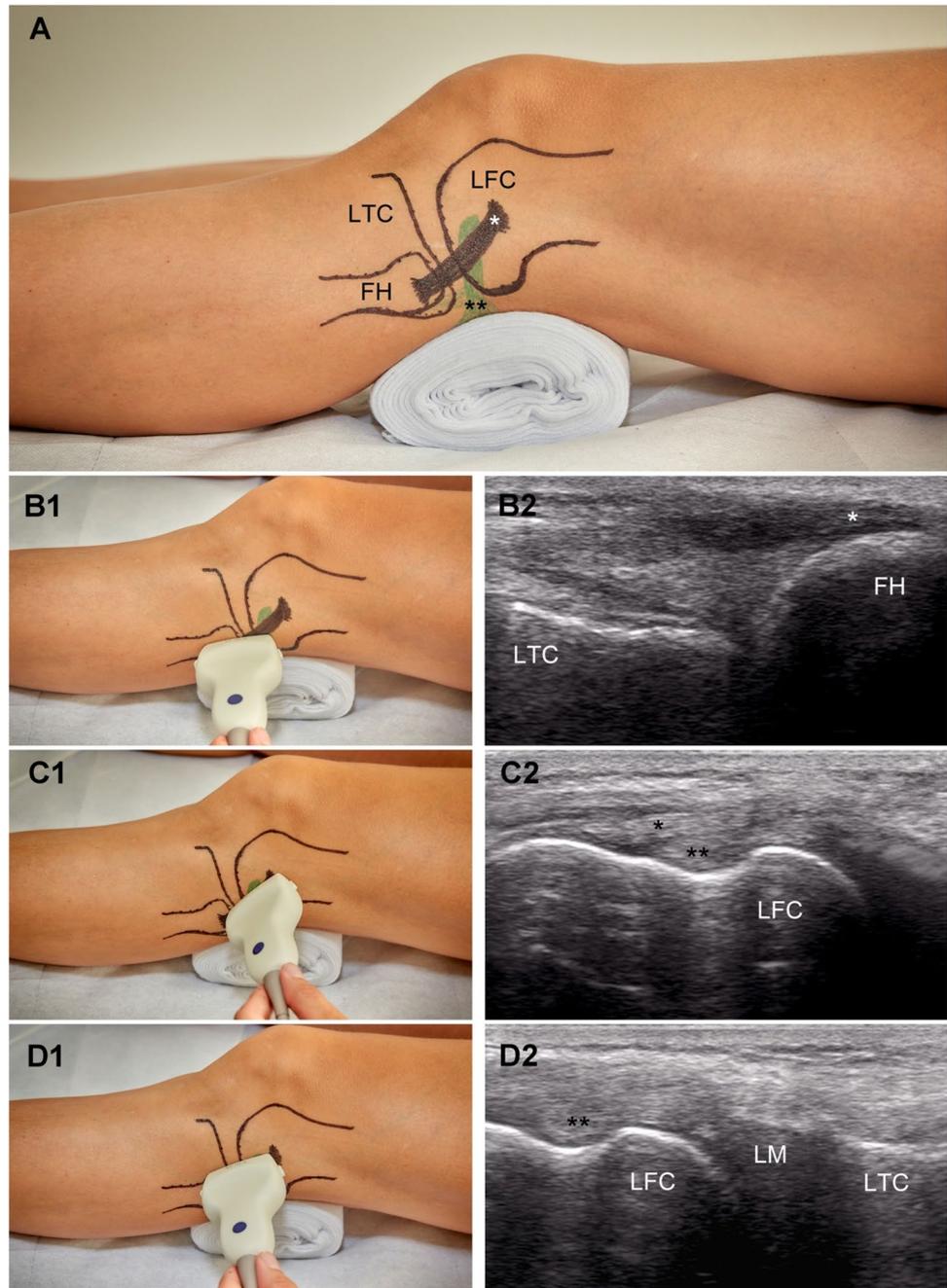
MR images were recorded in both knees of the patients assigned to Group II in an unloaded and loaded condition. Standardized knee positioning and axial load application were achieved using an MRI-compatible, pneumatically driven knee brace device (Ergospect GmbH, Innsbruck, Austria), which has recently been described in detail [15]. Consistent with the US examinations, neutral rotational alignment of the lower leg and 10° of knee flexion were defined as the standard position for image acquisition. With subjects lying in the supine position, the unloaded images were recorded first. Then, axial pressure equivalent to 50% of the individuals’ body weight was applied to simulate the bipedal stance.

A MAGNETOM Skyra 3.0 T MRI scanner (Siemens Healthcare AG, Erlangen, Germany) was used for image acquisition. Coronal, sagittal and axial fat-suppressed proton-density-weighted turbo spin-echo sequences were acquired for meniscus assessment in both loading conditions. The following MRI parameters were used: coronal (TR/TE = 4330/30 ms, FOV = 130 × 130 mm, slice thickness = 2 mm), sagittal (TR/TE = 2610/30 ms, FOV = 130 × 130 mm, slice thickness = 2 mm) and axial (TR/TE = 1950/29 ms, FOV = 150 × 150 mm, slice thickness = 2 mm). For lateral ME measurements, the coronal slice, in which the femoral origin of the PT was best visible, was selected.

### Image analyses

Absolute lateral ME was defined as the horizontal distance between the lateral tibial cortex margin and the most peripheral border of the lateral meniscus. Analyses of US and MR images were performed using ImageJ version 1.52a (Wayne Rasband, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) and Horos version 3.3.5 (<https://horosproject.org>, Annapolis,

**Fig. 2** Standardized ultrasound-based examination of lateral meniscal extrusion. **a** Lateral view of the knee joint depicting the relevant landmarks. **b1, b2, c1, c2, d1, d2** Transducer positioning and related ultrasound image for slice 1, 2 and 3, respectively. FH, fibular head. LFC, lateral femoral condyle. LM lateral meniscus. LTC lateral tibial condyle. \*, lateral collateral ligament. \*\*, popliteus tendon



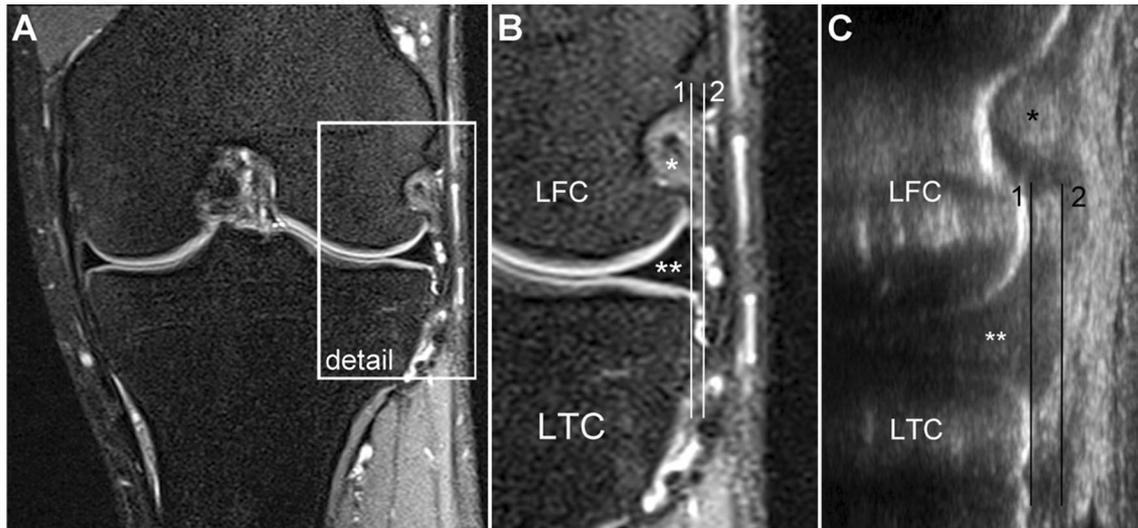
MD, USA), respectively. The precise procedure of image analyses is illustrated in Fig. 3.

### Statistical analyses

To assess interrater reliability for US examination, all measurements of lateral ME obtained by one examiner (means of two measurements obtained in the right and left knee in the supine, unloaded condition as well as the measurements obtained in the loaded condition) in Group I were pooled (total  $n=44$ ) and compared between the two raters by means

of a paired samples  $t$  test. In addition, the intraclass correlation coefficient (ICC) was calculated using a two-way random-effects model to quantify the absolute agreement of measurements [24]. The typical error of measurement was calculated by dividing the standard deviation of difference scores by the square root of 2 [25]. A correlation plot was created for visual inspection of the agreement of ratings.

For test–retest (intrarater) reliability analysis, the test–retest data obtained by the main observer (P.W.W.) in the unloaded condition for Group I were compared and the intraclass correlation coefficient was calculated using



**Fig. 3** Measurement technique. **a** MRI overview. Detail of the MR image (**b**) and ultrasound slice (**c**) for meniscal extrusion measurement. Lateral meniscal extrusion is defined as the horizontal distance between line 1 and line 2. Line 1, running along the lateral tibial

cortex margin. Line 2, running through the most peripheral lateral meniscus margin and parallel to line 1. *LFC* lateral femoral condyle. *LTC* lateral tibial condyle. \*, popliteus tendon. \*\*, lateral meniscus

a two-way mixed-effects model [24]. Further reliability statistics were calculated as for the interrater reliability analyses.

To assess measurement validity, the equivalence of US ( $n = 40$ ) and MRI ( $n = 40$ ) recordings of Group II was tested through the two one-sided  $t$  test (TOST) procedure for dependent means as per the principles of Lakens [26]. Differences of 0.5 mm were defined as the upper and lower limits of clinical equivalence. In addition, the ICC and typical error of measurement were calculated as for the test of intrarater reliability.

Additionally, group comparison (unloaded vs. loaded) for both imaging modalities for each group was performed by a paired  $t$  test. A paired  $t$ -test was also used to compare the healthy knee and the surgically treated knee in Group II (healthy vs. injured). Normal distribution of all data was confirmed using the Shapiro–Wilk test. Statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics (version 25, IBM, Armonk, NY, USA) and R (version 3.6.1, R Core Team, Vienna, Austria).

## Results

Eleven subjects (9 males, 2 females) with a mean age of  $25.5 \pm 3.75$  years (18–45 years) were included in Group I. For Group II, ten patients (8 males, 2 females) with a mean age of  $30.0 \pm 6.45$  years (23–43 years) were enrolled. All participants were able to complete all examinations, thus, no secondary exclusions were required.

## Reliability testing

### Interrater reliability

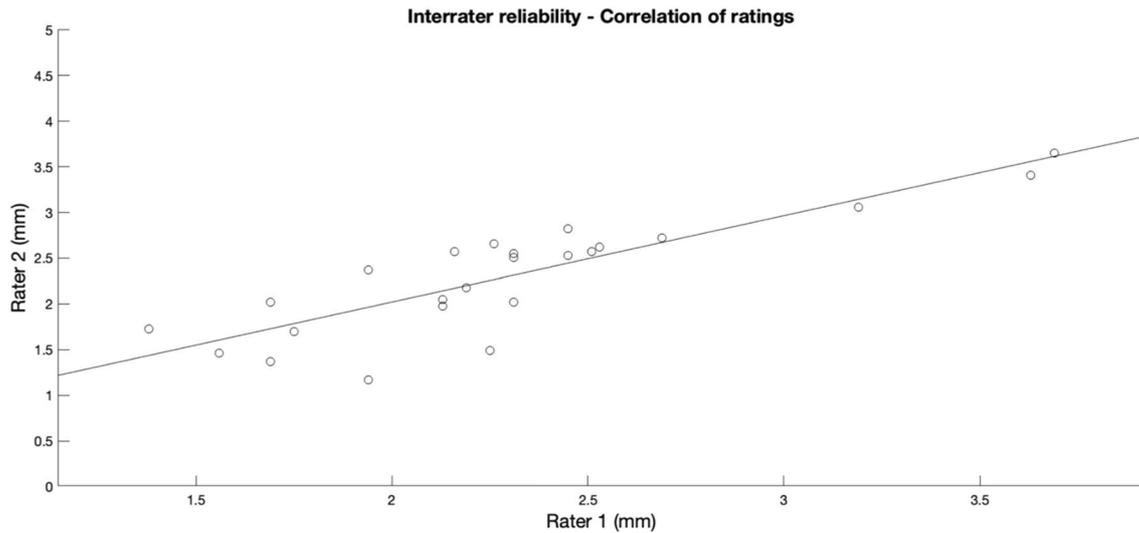
The average US-based measurements of lateral ME obtained by the two observers for Group I were  $2.5 \pm 0.6$  mm and  $2.5 \pm 0.7$  mm, respectively. This difference was found to be non-significant ( $t(43) = -0.695$ ,  $p = 0.491$ ). The intraclass correlation coefficient testified to good agreement of ratings (ICC = 0.904, 95% CI: 0.824–0.947). The typical error of measurement was 0.2 mm. A correlation plot of interrater reliability is shown in Fig. 4.

### Intrarater reliability

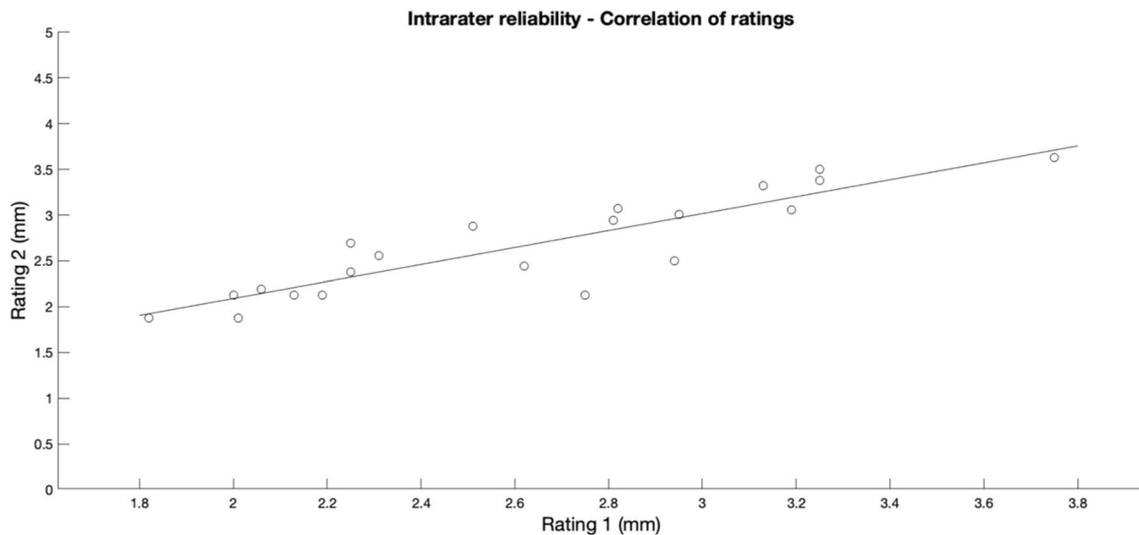
The data obtained through repeated US-based measurements in the supine position (unloaded condition) for Group I were very similar and not statistically different ( $2.6 \pm 0.5$  mm vs.  $2.7 \pm 0.5$  mm;  $t(21) = -0.837$ ,  $p = 0.412$ ). Excellent reproducibility of measurements was also confirmed by the intraclass correlation coefficient of 0.942 (95% CI: 0.861–0.976) and the typical error of measurement was 0.2 mm. A correlation plot of interrater reliability is shown in Fig. 5.

### Validity testing

In Group II, the mean lateral ME for both loading conditions as measured by US and MRI were  $2.9 \pm 0.8$  mm and  $1.8 \pm 0.9$  mm, respectively. The comparison of data revealed that ME as measured by US was greater by 1.1 mm (61.1%) as compared to MRI. Accordingly, the results of the TOST



**Fig. 4** Correlation plot of interrater reliability for ultrasound-based measurements of lateral meniscal extrusion



**Fig. 5** Correlation plot of intrater (main observer 1) reliability for ultrasound-based measurements of lateral meniscal extrusion

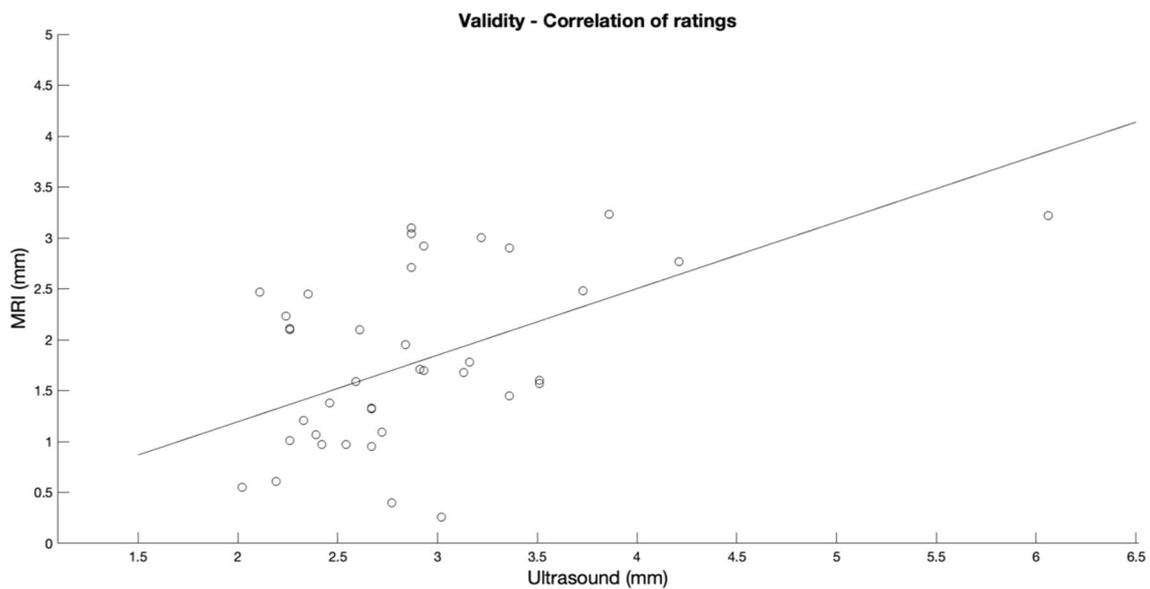
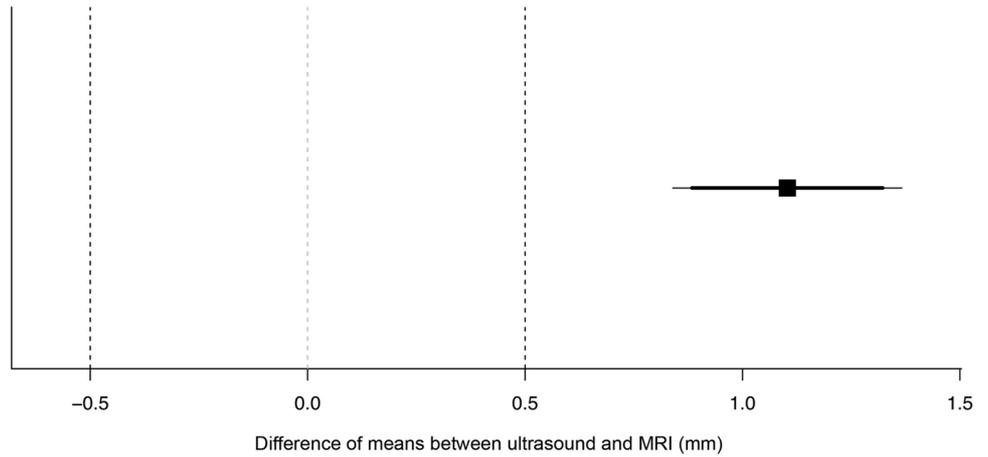
procedure confirmed that the means were not within the equivalence bounds of 0.5 mm ( $t(39) = 4.633$ ,  $p = 1.000$ ). The systematic overestimation of lateral ME by US is evident from Fig. 6. The intraclass correlation coefficient reflected poor agreement of measurements (ICC = 0.439, 95% CI: -0.221 to 0.750) and the typical error of measurement was 0.6 mm. A correlation plot reflecting the agreement of MRI and US data is shown in Fig. 7.

### Group comparison

In Group II, more lateral ME could be observed in the loaded compared to the unloaded condition (Table 1).

This difference was statistically significant for MRI-based measurements ( $t(19) = 2.110$ ,  $p = 0.048$ ), while no significant difference was observed for US-based measurements ( $t(19) = 0.353$ ,  $p = 0.728$ ). Interestingly, in Group I, the lateral ME as assessed by US was significantly smaller in the loaded condition compared to the unloaded condition,  $t(21) = -4.536$ ,  $p < 0.001$ . Comparison of the healthy and the surgically treated (injured) knees in Group II showed statistically significantly greater lateral ME for the surgically treated (injured) knees compared to the healthy knees in both MRI- and US-based measurements (MRI,  $t(19) = 6.583$ ,  $p < 0.001$ ; US,  $t(19) = 2.507$ ,  $p = 0.021$ ; Table 2).

**Fig. 6** Two one-sided *t* test (TOST) of equivalence of MRI and ultrasound recordings. Lateral meniscal extrusion as measured by ultrasound is greater by 1.1 mm as compared to MRI results. Measurements are not within the defined bounds (0.5 mm) of equivalence



**Fig. 7** Correlation plot to visualize the agreement of MRI- and ultrasound-based measurements of lateral meniscal extrusion

**Table 1** Lateral meniscal extrusion for the different loading conditions

	Group I ( <i>n</i> = 22)			Group II ( <i>n</i> = 20)			MRI		
	Ultrasound			Ultrasound					
	Unloaded	Loaded	<i>p</i> value	Unloaded	Loaded	<i>p</i> value	Unloaded	Loaded	<i>p</i> value
Lateral ME [mm]	2.6 ± 0.5	2.2 ± 0.5	<0.001*	2.8 ± 0.5	2.9 ± 1.0	0.728	1.6 ± 0.8	1.9 ± 1.0	0.048*

Measurements of lateral meniscal extrusion are presented as mean ± standard deviation

ME meniscal extrusion; *n* number of investigated knees for each group and each loading condition

\*Statistically significant difference between the unloaded and loaded condition (*p* < 0.05)

**Table 2** Lateral meniscal extrusion in the healthy and surgically treated (injured) knees in Group II

	Ultrasound		<i>p</i> value	MRI		<i>p</i> value
	Healthy ( <i>n</i> = 10)	Injured ( <i>n</i> = 10)		Healthy ( <i>n</i> = 10)	Injured ( <i>n</i> = 10)	
Lateral ME [mm]	2.6 ± 0.5	3.1 ± 0.9	0.021*	1.2 ± 0.7	2.3 ± 0.7	< 0.001*

Measurements of lateral meniscal extrusion are presented as mean ± standard deviation

ME meniscal extrusion; *n* number of investigated knees

\*Statistically significant difference between the healthy and surgically treated (injured) knees ( $p < 0.05$ )

## Discussion

The main findings of the present study were that US-based measurement of lateral ME (1) yields highly reliable data, provided a standardized measurement protocol is used, but (2) overestimates lateral ME as compared to MRI measurements, resulting in the poor agreement of measurement results.

Magnetic resonance imaging, the gold standard for meniscus evaluation [14], is time-consuming, costly and limited in that the acquisition of stress images [6, 11, 15] is not possible unless sophisticated loading devices are used. US, by contrast, is cost-effective, readily available and easily applicable in the standing position to obtain images under axial knee compression. However, while the technique has been successfully used for measurements of medial ME [3, 16–18], the validity and reliability of US-based measurements of lateral ME are unknown. In the present study, in vivo data of lateral ME analyzed by US were compared to data obtained by MRI.

Under load-bearing conditions, the menisci cover 59–71% of the tibial plateau articular surface [27]. This leads to an increase of the tibio-femoral contact area and a reduction of the transmitted contact pressure, thus protecting the cartilage from excessive stress and preventing early joint degeneration [1]. Meniscus tears are associated with increased ME [7, 8, 12, 19], leading to a decreased contact area and, consequently, increased contact pressure. This may ultimately promote the development or progression of knee joint osteoarthritis [9, 28]. In the present study, lateral ME was significantly higher in surgically treated knees compared to the contralateral healthy knees. This indicates that a combined anterior cruciate ligament reconstruction and lateral meniscal radial tear repair is not able to restore lateral ME to the level of the healthy contralateral knee. Thus, ME is an indicator for various pathologies [7, 8, 12] and can be used as a screening tool for knee joint osteoarthritis [10, 11, 29]. Additionally, recent studies [30, 31] have demonstrated that ME represents a negative prognostic factor regarding the outcome of arthroscopic partial meniscectomy. Considering the increasing clinical interest in ME, measurements need to be simple, reliable and cost-effective. In one study, 63% of patients with Schatzker type IV tibial plateau fractures

had concomitant lateral meniscal injuries diagnosed by MRI [32]. The authors assumed that the incidence of true lateral meniscal injuries was overestimated by MRI [32]. Therefore, US-based assessment of lateral ME may be used to evaluate the functional integrity of the lateral meniscus in Schatzker Type IV fractures to facilitate treatment decision-making regarding the meniscus.

Unexpectedly, higher values of lateral ME were observed in the unloaded compared to the loaded condition in Group I, while no significant difference was found in Group II. Given the physiological varus alignment of the lower limb and the positive correlation between medial ME and varus alignment [33, 34], an inverse effect for the lateral meniscus under loading conditions may be an explanation for this observation.

Numerous studies [2, 3, 9, 10, 13, 17, 29] have investigated medial ME using US. To obtain reliable measurements, distinct landmarks were defined, including the medial femoral epicondyle, the medial tibial condyle and the three-layered medial collateral ligament. To achieve optimal visualization of medial ME, the transducer is aligned in a longitudinal direction parallel to the fibers of the medial collateral ligament. As opposed to the detailed recommendations for the US-based examination of medial ME, scant literature about lateral ME measurements is available [19, 35, 36]. Rowland et al. [19] and Verdonk et al. [36] placed the longitudinally oriented transducer just anterior to the LCL but did not consider any further anatomical landmarks. Riecke et al. [35] did not provide information on the positioning of the transducer.

The present study represents the first attempt to provide a standardized US protocol for reliable in vivo investigation of lateral ME. Despite the known examiner-dependency of US, usage of clearly identifiable landmarks of the posterolateral knee corner and consistent imaging planes allowed for ME to be measured with good interrater (ICC = 0.904) and excellent intrarater (ICC = 0.942) reliability.

Different techniques for ME measurement have been described in the literature [5, 37, 38]. Coronal MR slices, as obtained in the present study, are oriented parallel to the posterior condylar line of the femur and represent the imaging standard for measurements of ME. It should be noted, however, that strictly coronal images may lead to

both underestimations of ME, when menisci extrude anteriorly or posteriorly from the imaging plane, and overestimations of ME, when measurements are obtained posterior to the joint midline. For these reasons, Jones et al. [38] have recently recommended obtaining radially orientated MR slices, running perpendicular to the tibial and meniscal rim, to minimize the risk of bias due to incorrect slice angulation. Since the spatial resolution of both MRI and US is excellent, deviations of results are likely due to differences in imaging planes. In the present study, US measurements of lateral ME were greater by 1.1 mm (+61.1%) as compared to extrusion measurements by MRI, resulting in the poor agreement of results. Thus, absolute extrusion measurements are not readily comparable to MRI. Nevertheless, reliability tests have demonstrated that US measurements of lateral ME are highly reproducible both within and between examiners, suggesting that the technique may be used to evaluate ME, provided that results are compared to US-specific normative data. In addition, usage of US appears feasible to longitudinally track the progression over time. Current literature reflects the increasing importance of evaluation of dynamic ME, [3, 12, 13] and underlines the necessity to develop cheap, simple and readily-available alternatives to MRI for its assessment.

## Limitations

Some limitations have to be considered when interpreting this study. First, patients presenting with clinical signs of knee joint osteoarthritis [22, 23] were excluded from this study. Therefore, reliability was only confirmed for knees free of joint degeneration. Osteoarthritis is accompanied by synovial hypertrophy [39], osteophytes and increased ME [2, 5, 9–11], potentially hindering reliable US assessment. However, no MRI examination was performed in the healthy volunteers assigned to Group I. The inclusion was based on the patients' medical history and clinical examination. Consequently, existing asymptomatic degenerative changes to the lateral meniscus could not be excluded, which may have affected the results.

An increasing amount of subcutaneous fatty tissue requires an increased US penetration depth. This leads to a lower resolution [40], complicating meniscus assessment and accurate extrusion measurement. In the present study, a BMI smaller than 30 was necessary for enrollment, suggesting that the presence of excessive perigenicular fatty tissue is unlikely. The assessment of lateral ME in patients with a BMI greater than 30 may be more challenging.

The examination of both knees under two different loading conditions resulted in a high number of images available for ME measurement. However, the absolute number of participants is a limiting factor of this trial.

## Conclusions

In summary, the present study provides evidence that:

- The implementation of a standardized US-based examination protocol leads to high levels of reliability for lateral ME measurement.
- Agreement with MRI, the current gold standard for meniscal extrusion measurement, was poor, with US systematically overestimating MRI results by 1.1 mm on average.

Based on these findings, we conclude that US is a reliable technique for lateral ME measurement, but measurement results are not readily comparable to MRI.

**Author contributions** All listed authors have contributed substantially to this work (P.W., G.W., C.F., A.B.I., C.Hep., R.C. for the study conception and design; P.W., G.W., C.Ho., C.F., R.C., B.H. for the data collection; P.W., R.C., G.W., C.F., B.H. for the data analysis; P.W., G.W., R.C., C.F., A.B.I., B.H. for the data interpretation; P.W., G.W., R.C., C.F., A.B.I. for the drafting of the manuscript, the figures, and the literature research; P.W., R.C., G.W., C.Ho., C.Hep., B.H., A.B.I., C.F. for critical revising the manuscript in terms of intellectual and professional input) and have approved the submission to Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery.

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

**Data availability** The datasets used and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

## Compliance with ethical standards

**Conflict of interest** C.F.:Royalties: Karl Storz, Medacta, Consultant: Medacta. A.B.I.: Royalties: Arthrex, Consultant: ArthroSurface, Medi.

**Ethical approval** The study was approved by the ethical review board of the Medical University of Innsbruck in February 2018 (reference number: 1251/2017). Each subject was informed in detail about the rationale for and procedures involved in the study, prior to obtaining written and verbal consent for participation.

**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## References

- Masouros SD, McDermott ID, Amis AA, Bull AM (2008) Biomechanics of the meniscus-meniscal ligament construct of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 16(12):1121–1132. <https://doi.org/10.1007/s00167-008-0616-9>
- Acebes C, Romero FI, Contreras MA, Mahillo I, Herrero-Beaumont G (2013) Dynamic ultrasound assessment of medial meniscal subluxation in knee osteoarthritis. *Rheumatology (Oxford)* 52(8):1443–1447. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/ket110>
- Acht nich A, Petersen W, Willinger L, Sauter A, Rasper M, Wortler K, Imhoff AB, Diermeier T (2018) Medial meniscus extrusion increases with age and BMI and is depending on different loading conditions. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(8):2282–2288. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-4885-7>
- Boxheimer L, Lutz AM, Treiber K, Goepfert K, Crook DW, Marinček B, Weishaupt D (2004) MR imaging of the knee: position related changes of the menisci in asymptomatic volunteers. *Invest Radiol* 39(5):254–263. <https://doi.org/10.1097/01.rli.0000116895.04239.84>
- Gale DR, Chaisson CE, Totterman SM, Schwartz RK, Gale ME, Felson D (1999) Meniscal subluxation: association with osteoarthritis and joint space narrowing. *Osteoarthritis Cartil* 7(6):526–532. <https://doi.org/10.1053/joca.1999.0256>
- Patel R, Eltgroth M, Souza R, Zhang CA, Majumdar S, Link TM, Motamedi D (2016) Loaded versus unloaded magnetic resonance imaging (MRI) of the knee: effect on meniscus extrusion in healthy volunteers and patients with osteoarthritis. *Eur J Radiol Open* 3:100–107. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2016.05.002>
- Ichiba A, Makuya K (2012) Radial displacement of the lateral meniscus before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arch Orthop Trauma Surg* 132(3):321–327. <https://doi.org/10.1007/s00402-011-1371-9>
- Zhang F, Bierma-Zeinstra SM, Oei EHG, Turkiewicz A, Englund M, Runhaar J (2017) Factors associated with meniscal body extrusion on knee MRI in overweight and obese women. *Osteoarthritis Cartil* 25(5):694–699. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2016.12.001>
- Kawaguchi K, Enokida M, Otsuki R, Teshima R (2012) Ultrasonographic evaluation of medial radial displacement of the medial meniscus in knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum* 64(1):173–180. <https://doi.org/10.1002/art.33319>
- Ozdemir M, Turan A (2019) Correlation between medial meniscal extrusion determined by dynamic ultrasound and magnetic resonance imaging findings of medial-type knee osteoarthritis in patients with knee pain. *J Ultrasound Med* 38(10):2709–2719. <https://doi.org/10.1002/jum.14976>
- Stehling C, Souza RB, Hellio Le Graverand MP, Wyman BT, Li X, Majumdar S, Link TM (2012) Loading of the knee during 3.0T MRI is associated with significantly increased medial meniscus extrusion in mild and moderate osteoarthritis. *Eur J Radiol* 81(8):1839–1845. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.05.027>
- Karpinski K, Diermeier T, Willinger L, Imhoff AB, Acht nich A, Petersen W (2019) No dynamic extrusion of the medial meniscus in ultrasound examination in patients with confirmed root tear lesion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27(10):3311–3317. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5341-4>
- Diermeier T, Beitzel K, Bachmann L, Petersen W, Esefeld K, Wortler K, Imhoff AB, Acht nich A (2019) Mountain ultramarathon results in temporary meniscus extrusion in healthy athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27(8):2691–2697. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5303-x>
- Blake MH, Lattermann C, Johnson DL (2017) MRI and arthroscopic evaluation of meniscal injuries. *Sports Med Arthrosc Rev* 25(4):219–226. <https://doi.org/10.1097/jsa.0000000000000168>
- Winkler PW, Wierer G, Csapo R, Hepperger C, Heinze B, Imhoff AB, Hoser C, Fink C (2020) Quantitative evaluation of dynamic lateral meniscal extrusion after radial tear repair. *Orthop J Sports Med* 8(4):2325967120914568. <https://doi.org/10.1177/2325967120914568>
- Cook JL, Cook CR, Stannard JP, Vaughn G, Wilson N, Roller BL, Stoker AM, Jayabalan P, Hdeib M, Kuroki K (2014) MRI versus ultrasonography to assess meniscal abnormalities in acute knees. *J Knee Surg* 27(4):319–324. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1367731>
- Nogueira-Barbosa MH, Gregio-Junior E, Lorenzato MM, Guermazi A, Roemer FW, Chagas-Neto FA, Crema MD (2015) Ultrasound assessment of medial meniscal extrusion: a validation study using MRI as reference standard. *AJR Am J Roentgenol* 204(3):584–588. <https://doi.org/10.2214/ajr.14.12522>
- Reisner JH, Franco JM, Hollman JH, Johnson AC, Sellon JL, Finnoff JT (2020) Ultrasound assessment of weight-bearing and non-weight-bearing meniscal extrusion: a reliability study. *PM&R* 12(1):26–35. <https://doi.org/10.1002/pmrj.12183>
- Rowland G, Mar D, McIff T, Nelson J (2016) Evaluation of meniscal extrusion with posterior root disruption and repair using ultrasound. *Knee* 23(4):627–630. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.04.008>
- Navali AM, Bahari LAS, Nazari B (2012) A comparative assessment of alternatives to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 4(1):40–40. <https://doi.org/10.1186/1758-2555-4-40>
- Hinman RS, May RL, Crossley KM (2006) Is there an alternative to the full-leg radiograph for determining knee joint alignment in osteoarthritis? *Arthritis Rheum* 55(2):306–313. <https://doi.org/10.1002/art.21836>
- Altman R, Asch E, Bloch D, Bole G, Borenstein D, Brandt K, Christy W, Cooke TD, Greenwald R, Hochberg M et al (1986) Development of criteria for the classification and reporting of osteoarthritis. Classification of osteoarthritis of the knee. Diagnostic and Therapeutic Criteria Committee of the American Rheumatism Association. *Arthritis Rheum* 29(8):1039–1049. <https://doi.org/10.1002/art.1780290816>
- Parsons C, Fuggle NR, Edwards MH, Goulston L, Litwic AE, Jagannath D, van der Pas S, Cooper C, Dennison EM, Group TER (2018) Concordance between clinical and radiographic evaluations of knee osteoarthritis. *Aging Clin Exp Res* 30(1):17–25. <https://doi.org/10.1007/s40520-017-0847-z>
- Koo TK, Li MY (2016) A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *J Chiropr Med* 15(2):155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Hopkins WG (2000) Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med* 30(1):1–15. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00001>
- Lakens D (2017) Equivalence tests: a practical primer for t tests, correlations, and meta-analyses. *Soc Psychol Personal Sci* 8(4):355–362. <https://doi.org/10.1177/1948550617697177>
- Walker PS, Erkman MJ (1975) The role of the menisci in force transmission across the knee. *Clin Orthop Relat Res* 109:184–192. <https://doi.org/10.1097/00003086-197506000-00027>
- Berthiaume MJ, Raynauld JP, Martel-Pelletier J, Labonte F, Beaudoin G, Bloch DA, Choquette D, Haraoui B, Altman RD, Hochberg M, Meyer JM, Cline GA, Pelletier JP (2005) Meniscal tear and extrusion are strongly associated with progression of symptomatic knee osteoarthritis as assessed by quantitative magnetic resonance imaging. *Ann Rheum Dis* 64(4):556–563. <https://doi.org/10.1136/ard.2004.023796>
- Murakami T, Enokida M, Kawaguchi K, Otsuki R, Nagashima H (2017) Useful ultrasonographic evaluation of the medial meniscus as a feature predicting the onset of radiographic

- knee osteoarthritis. *J Orthop Sci* 22(2):318–324. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2016.11.021>
30. Kim SJ, Choi CH, Chun YM, Kim SH, Lee SK, Jang J, Jeong H, Jung M (2017) Relationship between preoperative extrusion of the medial meniscus and surgical outcomes after partial meniscectomy. *Am J Sports Med* 45(8):1864–1871. <https://doi.org/10.1177/0363546517697302>
  31. Kise NJ, Aga C, Engebretsen L, Roos EM, Tariq R, Risberg MA (2019) Complex tears, extrusion, and larger excision are prognostic factors for worse outcomes 1 and 2 years after arthroscopic partial meniscectomy for degenerative meniscal tears: a secondary explorative study of the surgically treated group from the odense-oslo meniscectomy versus exercise (OMEX) trial. *Am J Sports Med* 47(10):2402–2411. <https://doi.org/10.1177/0363546519858602>
  32. Yan B, Sun J, Yin W (2020) The prevalence of soft tissue injuries in operative Schatzker type IV tibial plateau fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03533-0>
  33. Strecker W (2007) Planning analysis of knee-adjacent deformities : I. Frontal plane deformities. *Eur J Trauma Emerg Surg* 33(6):662–668. <https://doi.org/10.1007/s00068-007-5175-0>
  34. Willinger L, Lang JJ, von Deimling C, Diermeier T, Petersen W, Imhoff AB, Burgkart R, Achtenich A (2020) Varus alignment increases medial meniscus extrusion and peak contact pressure: a biomechanical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28(4):1092–1098. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05701-1>
  35. Riecke BF, Christensen R, Torp-Pedersen S, Boesen M, Gudbergesen H, Bliddal H (2014) An ultrasound score for knee osteoarthritis: a cross-sectional validation study. *Osteoarthr Cartil* 22(10):1675–1691. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.06.020>
  36. Verdonk P, Depaape Y, Desmyter S, De Muynck M, Almqvist KF, Verstraete K, Verdonk R (2004) Normal and transplanted lateral knee menisci: evaluation of extrusion using magnetic resonance imaging and ultrasound. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 12(5):411–419. <https://doi.org/10.1007/s00167-004-0500-1>
  37. Crema MD, Roemer FW, Felson DT, Englund M, Wang K, Jarraya M, Nevitt MC, Marra MD, Torner JC, Lewis CE, Guermazi A (2012) Factors associated with meniscal extrusion in knees with or at risk for osteoarthritis: the Multicenter Osteoarthritis study. *Radiology* 264(2):494–503. <https://doi.org/10.1148/radiol.12110986>
  38. Jones LD, Mellon SJ, Kruger N, Monk AP, Price AJ, Beard DJ (2018) Medial meniscal extrusion: a validation study comparing different methods of assessment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(4):1152–1157. <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4544-4>
  39. Pelletier JP, Martel-Pelletier J, Abramson SB (2001) Osteoarthritis, an inflammatory disease: potential implication for the selection of new therapeutic targets. *Arthritis Rheum* 44(6):1237–1247. [https://doi.org/10.1002/1529-0131\(200106\)44:6%3c1237::Aid-art214%3e3.0.Co;2-f](https://doi.org/10.1002/1529-0131(200106)44:6%3c1237::Aid-art214%3e3.0.Co;2-f)
  40. Taljanovic MS, Melville DM, Scalcione LR, Gimber LH, Lorenz EJ, Witte RS (2014) Artifacts in musculoskeletal ultrasonography. *Semin Musculoskelet Radiol* 18(1):3–11. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1365830>

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

## FRAGEBOGEN – Dynamische Außenmeniskusextrusion

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,  
Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, an der Nachuntersuchung Ihres Kniegelenks teilzunehmen. Die folgenden Fragen dienen der Erhebung spezifischer Parameter, welche sich allesamt auf Ihr operiertes Kniegelenk beziehen. Die Ergebnisse dieser Daten werden zum einen zur internen Qualitätskontrolle und zum anderen zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Meniskus Chirurgie verwendet.

Die Beantwortung aller Fragen wird für Sie etwa 10-20 Minuten in Anspruch nehmen. Bitte füllen Sie alle Fragen gewissenhaft aus, um die Qualität dieser Studie auf hohem Niveau zu halten.

Wir möchten Sie ausdrücklich darauf aufmerksam machen, dass alle erhobenen Daten ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken dienen. Die Auswertung der Daten erfolgt mit größter Sorgfalt und nicht personenbezogen. Die Teilnahme erfolgt freiwillig. Die Ablehnung der Teilnahme oder ein vorzeitiges Ausscheiden hat keine nachteiligen Folgen für Ihre weitere medizinische Betreuung. Durch das Ausfüllen des Bogens erklären Sie sich bereit, Ihre Daten im Rahmen der wissenschaftlichen Verwendung der Praxis Dr. Fink, Dr. Hoser, Dr. Gföller und Dr. Braun zur Verfügung zu stellen.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme und viel Spaß beim Beantworten der Fragen!

### SOZIODEMOGRAFISCHE DATEN

**Name:** \_\_\_\_\_ **Geschlecht:**  ♀  ♂ **Geburtsdatum:** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**Heutiges Datum:** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ **Datum der Operation (falls zutreffend):** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**Verletzungsdatum:** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ **Verletztes Kniegelenk:**  rechts  links

**Gewicht:** \_\_\_\_\_ kg **Größe:** \_\_\_\_\_ cm

**Sind Sie Raucher/in?**  Ja  Nein

**Arbeitsstatus:**  Vollzeit  Teilzeit  Pensioniert  
 Haushalt  Student  Arbeits- oder Erwerbsunfähig  
 Anders: \_\_\_\_\_

**Welche sind Ihre beiden Hauptsportarten?** 1) \_\_\_\_\_  
2) \_\_\_\_\_

**Wie oft üben Sie Ihre beiden Hauptsportarten im Schnitt pro Woche aus?**

Sportart 1: \_\_\_ mal/Woche für ca. \_\_\_ Stunden

Sportart 2: \_\_\_ mal/Woche für ca. \_\_\_ Stunden

**Auf welchem Level würden Sie sagen, üben Sie Ihre Sportart 1 aus?**

Anfänger  Fortgeschritten  
 Experte  Profi

## LYSHOLM SCORE

Bitte wählen Sie bei den folgenden Fragen jene Antwort, welche am ehesten auf den Zustand ihres Kniegelenks zutrifft. (Nur ein Kästchen pro Frage)

<p><b>1. Hinken Sie?</b></p> <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Leicht oder gelegentlich <input type="checkbox"/> Stark und immer	<p><b>5. Haben Sie Schmerzen im Knie?</b></p> <input type="checkbox"/> Nie <input type="checkbox"/> Unbeständig und leicht bei starker Belastung <input type="checkbox"/> Spürbar bei starker Belastung <input type="checkbox"/> Spürbar bei oder nach einer Gehstrecke von über 2 km Länge <input type="checkbox"/> Spürbar bei oder nach einer Gehstrecke von weniger als 2 km Länge <input type="checkbox"/> Ständig
<p><b>2. Benötigen Sie eine Gehhilfe?</b></p> <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Stock oder Krücke <input type="checkbox"/> Belastung nicht möglich	<p><b>6. Ist Ihr Kniegelenk geschwollen?</b></p> <input type="checkbox"/> Nie <input type="checkbox"/> Unter starker Belastung <input type="checkbox"/> Ständig <input type="checkbox"/> Bei gewöhnlicher Belastung
<p><b>3. Blockiert Ihr Knie?</b></p> <input type="checkbox"/> Keine Blockierung und kein Gefühl der Einklemmung <input type="checkbox"/> Gefühl der Einklemmung aber keine Blockierung <input type="checkbox"/> Gelegentliche Blockierung <input type="checkbox"/> Häufige Blockierung <input type="checkbox"/> Blockiertes Gelenk bei der Untersuchung	<p><b>7. Können Sie Kauern/in die Hocke gehen?</b></p> <input type="checkbox"/> Ohne Probleme <input type="checkbox"/> Leichte Beeinträchtigung <input type="checkbox"/> Nicht über 90° <input type="checkbox"/> Nicht möglich
<p><b>4. Ist Ihr Knie instabil?</b></p> <input type="checkbox"/> Kein Instabilitätsgefühl <input type="checkbox"/> Selten beim Sport oder bei anderen anstrengenden Tätigkeiten <input type="checkbox"/> Häufig beim Sport oder bei anderen anstrengenden Tätigkeiten <input type="checkbox"/> Gelegentlich bei alltäglichen Tätigkeiten <input type="checkbox"/> Häufig bei alltäglichen Tätigkeiten <input type="checkbox"/> Bei jedem Schritt	<p><b>8. Können Sie Treppensteigen?</b></p> <input type="checkbox"/> Ohne Probleme <input type="checkbox"/> Leichte Beeinträchtigung <input type="checkbox"/> Schrittweise <input type="checkbox"/> Nicht möglich

## VISUELLE ANALOGSKALA (VAS) FÜR SCHMERZ

Bitte fügen Sie, entsprechend ihrer aktuellen Schmerzintensität (bezogen auf das operierte Kniegelenk), eine Markierung am folgenden Balken hinzu.

Keine  
Schmerzen



Stärkste  
vorstellbare  
Schmerzen

## TEGNER AKTIVITÄTSSKALA

**Die folgende Frage beschäftigt sich mit Ihrem Aktivitätslevel. Bitte lesen Sie zuerst alle 10 Punkte aufmerksam durch und entscheiden Sie dann, welches Level Ihren Aktivitätszustand am besten beschreibt. Berücksichtigen Sie bei der Beantwortung der Frage insbesondere Ihre sportliche Aktivität. Wenn Sie beispielsweise einer leichten körperlichen Arbeit nachgehen (Level 2), in Ihrer Freizeit jedoch regelmäßig Joggen gehen (Level 6), dann wählen Sie bitte Level 6 als Antwort aus.**

<input type="checkbox"/> Level 0	Arbeitsunfähigkeit oder Berentung aufgrund der Knieprobleme
<input type="checkbox"/> Level 1	Sitzende Berufstätigkeit (z.B. SekretärIn) / Spaziergehen auf ebener Strecke möglich
<input type="checkbox"/> Level 2	Körperlich leichte Arbeit (z.B. Verkäuferin, LehrerIn) / Spaziergehen auf unebener Strecke möglich
<input type="checkbox"/> Level 3	Körperlich mittelschwere Arbeit (z.B. KrankenpflegerIn, Koch, Hausfrau mit kleinem Haushalt) / Leistungs- oder Freizeitsportler: Schwimmen, Wandern (ca. 5 km/h)
<input type="checkbox"/> Level 4	Körperlich schwere Arbeit (z.B. Putzfrau, MalerIn, Hausfrau mit großem Haushalt) / Freizeitsport: Radfahren, Skilanglauf, Joggen 2 x pro Woche auf ebener Strecke
<input type="checkbox"/> Level 5	Körperliche Schwerstarbeit (z.B. Bergbau, Straßenbau, Waldarbeiten) / Freizeitsport: Joggen 2 x pro Woche auf unebener Strecke
<input type="checkbox"/> Level 6	Freizeitsport: Tennis, Badminton, Handball, Basketball, Skiabfahrtslauf, Joggen häufiger als 2 x pro Woche
<input type="checkbox"/> Level 7	Leistungssport: Tennis, Leichtathletik (Laufen), Motocross, Handball, Basketball, Querfeldeinlauf / Freizeitsport: Fußball, Hockey, Squash, Badminton, Leichtathletik (Weitsprung), Querfeldeinlauf
<input type="checkbox"/> Level 8	Leistungssport: Hockey, Squash, Badminton, Leichtathletik (Weitsprung), Skiabfahrtslauf
<input type="checkbox"/> Level 9	Leistungssport: Fußball (niedrige Klasse), Eishockey, Ringen, Geräteturnen
<input type="checkbox"/> Level 10	Leistungssport: Fußball (national, international)

## INTERNATIONAL KNEE DOCUMENTATION COMMITTEE (IKDC)

(Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Knies)

### Symptome\*:

\* Wählen Sie zur Beurteilung der Symptome die höchste Aktivitätsstufe, die Sie Ihrer Meinung nach ohne erhebliche Symptome ausüben könnten, selbst wenn Sie auf dieser Stufe keine Aktivitäten ausüben.

### 1. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliche Schmerzen im Knie ausüben können?

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund meiner Schmerzen im Knie keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

### 2. Wie oft hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen oder seit dem Auftreten Ihrer Verletzung Schmerzen?

Kreuzen Sie eines der Kästchen in der nachstehenden Skala an. Die Skala beginnt mit 0 (Nie) und geht mit zunehmender Häufigkeit der Schmerzen bis zu 10 (ständig Schmerzen).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nie	<input type="checkbox"/>	ständig Schmerzen										

### 3. Wie stark sind Ihre Schmerzen?

Kreuzen Sie eines der Kästchen in der nachstehenden Skala an. Die Skala beginnt mit 0 (keine Schmerzen) und geht mit zunehmender Stärke der Schmerzen bis zu 10 (unerträgliche Schmerzen).

Keine	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Schmerzen	<input type="checkbox"/>	unerträgliche Schmerzen										

### 4. Wie steif oder geschwollen war Ihr Knie während der vergangenen 4 Wochen oder seit dem Auftreten Ihrer Verletzung?

- überhaupt nicht
- etwas
- ziemlich
- sehr
- extrem

### 5. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliches Anschwellen des Knies ausüben können?

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund eines geschwollenen Knies keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

**6. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen oder seit dem Auftreten Ihrer Verletzung ein blockiertes/gesperrtes Kniegelenk oder ist Ihr Kniegelenk aus- und wieder eingeschnappt?**

- Ja     Nein

**7. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, die Sie ohne erhebliche durch Knieschwäche verursachte Gangunsicherheit einhalten können?**

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund der Knieschwäche keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

**Sportliche Betätigung:**

**8. Was ist die höchste Aktivitätsstufe, an der Sie regelmäßig teilnehmen können?**

- Sehr anstrengende Aktivitäten wie Springen oder Drehbewegungen bei einseitiger Fußbelastung (Basketball oder Fußball)
- Anstrengende Aktivitäten wie schwere körperliche Arbeit, Skilaufen oder Tennis
- Mäßig anstrengende Aktivitäten wie mäßige körperliche Arbeit, Laufen oder Joggen
- Leichte Aktivitäten wie Gehen, Haus- oder Gartenarbeit
- Ich kann aufgrund meines Knies keine der oben genannten Aktivitäten ausführen.

**9. Wie schwierig sind für Sie die folgenden Aktivitäten aufgrund Ihres Knies?**

	überhaupt nicht schwierig	minimal schwierig	ziemlich schwierig	extrem schwierig	unmöglich
a. Treppensteigen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Treppe hinuntergehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Auf dem vorderen Knie knien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Hockstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e. Normal sitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f. Vom Stuhl aufstehen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g. Geradeaus laufen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h. Hochspringen und auf dem betroffenen Bein landen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i. Beim Gehen (bzw. Laufen, wenn Sie Sportler/in sind) schnell anhalten und starten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Funktion:**

**10. Wie würden Sie die Funktionsfähigkeit Ihres Knies auf einer Skala von 0 bis 10 beurteilen, wobei 10 eine normale und ausgezeichnete Funktionsfähigkeit bezeichnet und 0 die Unfähigkeit, irgendeine Ihrer normalen täglichen Aktivitäten, darunter möglicherweise auch Sport, auszuführen?**

**FUNKTIONSFÄHIGKEIT VOR DER Knieverletzung:**

Kann keine täglichen Aktivitäten ausführen	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keine Einschränkung der täglichen Aktivitäten
	<input type="checkbox"/>											

DERZEITIGE FUNKTIONSFÄHIGKEIT IHRES KNIES:

Kann keine											Keine Einschränkung
täglichen Akti-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 der täglichen
vitäten ausführen	<input type="checkbox"/> Aktivitäten										

**KOOS KNIE SCORE**

*In diesem Fragebogen geht es um Ihren Eindruck von Ihrem Knie. Ihre Angaben werden uns helfen, nachzuvollziehen, wie es Ihrem Knie Ihrer Meinung nach geht und wie gut Sie in der Lage sind, Ihren üblichen Tätigkeiten nachzugehen. Beantworten Sie bitte jede Frage durch Ankreuzen des entsprechenden Kästchens. Bitte kreuzen Sie nur ein Kästchen pro Frage an. Wenn Sie sich unsicher sind, wie Sie die Frage beantworten sollen, wählen Sie die Antwort aus, die Ihnen am zutreffendsten erscheint.*

**Beschwerden:**

Diese Fragen beziehen sich auf Beschwerden in Ihrem Knie in der letzten Woche.

**S1. War Ihr Knie geschwollen?**

niemals       selten       manchmal       oft       immer

**S2. Haben Sie ein Knirschen verspürt, ein Klicken oder irgendein anderes Geräusch gehört, wenn Sie Ihr Knie bewegten?**

niemals       selten       manchmal       oft       immer

**S3. Ist Ihr Knie hängen geblieben, oder hat es blockiert, wenn Sie es bewegten?**

niemals       selten       manchmal       oft       immer

**S4. Konnten Sie Ihr Knie ganz strecken?**

niemals       selten       manchmal       oft       immer

**S5. Konnten Sie Ihr Knie ganz beugen?**

niemals       selten       manchmal       oft       immer

**Steifigkeit:**

In den nachfolgenden Fragen geht es um die Steifigkeit Ihres Kniegelenkes während der letzten Woche. Unter Steifigkeit versteht man ein Gefühl der Einschränkung oder Verlangsamung der Fähigkeit, Ihr Kniegelenk zu bewegen.

**S6. Wie stark war Ihre KniestEIFigkeit morgens direkt nach dem Aufstehen?**

keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**S7. Wie stark war Ihre KniestEIFigkeit später am Tag, nachdem Sie saßen, lagen, oder sich ausruhten?**

keine       schwach       mäßig       stark       sehr stark

**Schmerzen:**

**P1. Wie oft tut Ihnen Ihr Knie weh?**

- niemals                       mind. einmal im Monat                       mind. einmal in der Woche                       mind. einmal am Tag                       immer

Wie stark waren die Schmerzen in Ihrem Knie in der letzten Woche bei den folgenden Tätigkeiten?

**P2. Drehbewegung des Beins mit dem Knie**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P3. Ihr Knie ganz strecken**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P4. Ihr Knie ganz beugen**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P5. Auf ebenem Boden gehen**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P6. Treppen hinauf- oder hinuntergehen**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P7. Nachts im Bett**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P8. Sitzen oder Liegen?**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**P9. Aufrecht stehen?**

- keine                       schwach                       mäßig                       stark                       sehr stark

**Körperliche Funktionsfähigkeit, Aktivitäten des täglichen Lebens:**

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Funktionsfähigkeit. Hierunter verstehen wir Ihre Fähigkeit, sich selbständig zu bewegen und sich selbst zu versorgen. Geben Sie bitte bei jeder der nachfolgenden Tätigkeiten das Ausmaß der Schwierigkeiten an, die Sie in der letzten Woche wegen Ihres Kniegelenks damit hatten.

**A1. Treppen hinuntersteigen**

- keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**A2. Treppen hinaufsteigen**

- keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**A3. Vom Sitzen aufstehen**

- keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**A4. Aufrecht stehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A5. Sich zu Boden bücken, etwas vom Boden aufheben**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

Geben Sie bitte bei jeder der nachfolgenden Tätigkeiten das Ausmaß der Schwierigkeiten an, die Sie in der letzten Woche wegen Ihres Kniegelenks damit hatten.

---

**A6. Auf ebenem Boden gehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A7. Ins Auto einsteigen oder aus dem Auto aussteigen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A8. Einkaufen gehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A9. Socken/ Strümpfe anziehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A10. Vom Bett aufstehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A11. Socken/ Strümpfe ausziehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A12. Im Bett liegen (beim Umdrehen, oder wenn das Kniegelenk längere Zeit unverändert in einer Stellung ist)**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A13. In die Badewanne oder aus der Badewanne steigen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A14. Sitzen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A15. Sich auf die Toilette setzen oder aufstehen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A16. Schwere Hausarbeit verrichten (schwere Kisten bewegen, schwere Einkäufe tragen usw.)**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**A17. Leichte Hausarbeit verrichten (kochen, Staub wischen usw.)**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

---

**Körperliche Funktionsfähigkeit, Sport und Freizeitaktivitäten:**

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Belastbarkeit bei stärkerer körperlicher Betätigung. Geben Sie bitte bei jeder der nachfolgenden Tätigkeiten das Ausmaß der Schwierigkeiten an, die Sie in der letzten Woche wegen Ihres Kniegelenks damit hatten.

**SP1. Hocken**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

Geben Sie bitte bei jeder der nachfolgenden Tätigkeiten das Ausmaß der Schwierigkeiten an, die Sie in der letzten Woche wegen Ihres Kniegelenks damit hatten.

**SP2. Laufen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**SP3. Springen**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**SP4. Drehbewegung des Beins mit dem kranken Knie**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**SP5. Knien**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

**Lebensqualität:**

**Q1. Wie oft denken Sie an Ihr Knieproblem?**

niemals                       mind. einmal im Monat                       mind. einmal in der Woche                       mind. einmal am Tag                       immer

**Q2. Haben Sie Ihre Lebensweise verändert um Tätigkeiten zu vermeiden, die Ihrem Knie schaden könnten?**

gar nicht                       wenig                       etwas                       stark                       vollständig

**Q3. Wie sehr macht es Ihnen zu schaffen, dass Sie sich auf Ihr Knie nicht verlassen können?**

gar nicht                       wenig                       mäßig                       ziemlich                       sehr

**Q4. Wie viele Schwierigkeiten haben Sie durch das Knie insgesamt?**

keine                       wenig                       einige                       große                       sehr große

# IKDC – Formblatt zur Untersuchung des Kniegelenks

Allgemeine Laxizität:	<input type="checkbox"/> Verminderte Laxizität	<input type="checkbox"/> Normal	<input type="checkbox"/> Erhöhte Laxizität
Beinachse	<input type="checkbox"/> Eindeutig Varus	<input type="checkbox"/> Normal	<input type="checkbox"/> Eindeutig Valgus
Patellastellung	<input type="checkbox"/> Baja	<input type="checkbox"/> Normal	<input type="checkbox"/> Alta
Subluxation/Dislokation der Patella	<input type="checkbox"/> Zentriert	<input type="checkbox"/> Subluxierbar	<input type="checkbox"/> Disloziert

Bewegungsausmaß (Streckung/Beugung):			
Betroffene Seite	Passiv <u>  </u> / <u>  </u> / <u>  </u>	Aktiv <u>  </u> / <u>  </u> / <u>  </u>	
Normale Seite	Passiv <u>  </u> / <u>  </u> / <u>  </u>	Aktiv <u>  </u> / <u>  </u> / <u>  </u>	

Gruppen	Vier Grade				Gruppengrad			
	Normal	Fast Normal	Abnormal	Deutlich abnormal	A	B	C	D
<b>Erguß</b>	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Leicht	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> deutlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Passives Bewegungsdefizit</b>								
Streckdefizit	<input type="checkbox"/> <3°	<input type="checkbox"/> 3-5°	<input type="checkbox"/> 6-10°	<input type="checkbox"/> >10°				
Beugedefizit	<input type="checkbox"/> 0-5°	<input type="checkbox"/> 6-15°	<input type="checkbox"/> 16-25°	<input type="checkbox"/> >25°	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Ligamentuntersuchung</b>								
Lachmann Test (25° Beugung)	<input type="checkbox"/> -1-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> >10mm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(134N)		<input type="checkbox"/> <-1-3	<input type="checkbox"/> <-3steif					
Lachmann Test (25° Beugung) manuell, max.	<input type="checkbox"/> -1-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> >10mm				
Vorderer Endpunkt	<input type="checkbox"/> fest		<input type="checkbox"/> unsicher					
Gesamt AP Translation (25°)	<input type="checkbox"/> 0-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> > 10mm				
Gesamt AP Translation (75°)	<input type="checkbox"/> 0-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> > 10mm				
Hintere Schublade (70°)	<input type="checkbox"/> 0-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> > 10mm				
Valgusstress	<input type="checkbox"/> 0-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> > 10mm				
Varusstress	<input type="checkbox"/> 0-2mm	<input type="checkbox"/> 3-5mm	<input type="checkbox"/> 6-10mm	<input type="checkbox"/> > 10mm				
Außenrotationstest (30°)	<input type="checkbox"/> <5°	<input type="checkbox"/> 6-10°	<input type="checkbox"/> 11-19°	<input type="checkbox"/> > 20°				
Außenrotationstest (90°)	<input type="checkbox"/> <5°	<input type="checkbox"/> 6-10°	<input type="checkbox"/> 11-19°	<input type="checkbox"/> > 20°				
Pivot shift	<input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> +gleiten	<input type="checkbox"/> ++(dumpf)	<input type="checkbox"/> +++(laut)				
Reverse pivot shift	<input type="checkbox"/> gleich	<input type="checkbox"/> gleiten	<input type="checkbox"/> stark	<input type="checkbox"/> ausgeprägt				
<b>Kompartimentbefunde</b>								
Krepitation anterior (PF)	<input type="checkbox"/> kein	<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
Krepitation mediales Komp.	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
Krepitation laterales Komp.	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Leichtem Schmerz	<input type="checkbox"/> > leichtem Schmerz				
<b>Transplantatentnahme-morbidität</b>								
	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
<b>Röntgenbefund</b>								
Medialer Gelenkspalt	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
Lateraler Gelenkspalt	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
Femoropatellar-Gelenk	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
Vorderer Gelenkspalt (sagittal)	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
Hinterer Gelenkspalt	<input type="checkbox"/> Kein	<input type="checkbox"/> Gering	<input type="checkbox"/> Mäßig	<input type="checkbox"/> Deutlich				
<b>Funktionstest</b>								
Hüpfen auf einem Bein (in % der gegenüberliegenden Seite)	<input type="checkbox"/> ≥ 90%	<input type="checkbox"/> 89-76%	<input type="checkbox"/> 75-50%	<input type="checkbox"/> < 50%				
<b>Abschlussbeurteilung</b>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>