



Fakultät für Medizin

**Meniskusfunktion unter Extremlastung -
Untersuchung gesunder Athleten
während eines Bergultramarathons**

Laura Bachmann

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

Vorsitz: Prof. Dr. Wolfgang Weber

Prüfende/-r:

1. Prof. Dr. Andreas B. Imhoff
2. Prof. Dr. Henning Wackerhage

Die Dissertation wurde am 09.02.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Medizin am 11.05.2021 angenommen.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie war es, die Auswirkungen eines Ultramarathons auf die mediale Meniskusextrusion (MME) zu untersuchen. Unsere Hypothese war, dass die Belastung zu einer reversiblen MME über 3 mm führt. Generell wird eine MME von mehr als 3 mm als pathologisch angesehen und ist ein indirektes Zeichen für einen Funktionsverlust des Meniskus.

Eingeschlossen wurden gesunde Athleten des Gore-Tex® Transalpine-Run 2017 (7 Etappen mit insgesamt 270,5 km und 16453 Hm) ohne Voroperationen oder aktuellen Verletzungen am untersuchten Knie. Vor dem Lauf wurde bei allen Athleten eine standardisierte klinische Untersuchung und eine Magnetresonanztomographie (MRT) zum Ausschluss von Pathologien durchgeführt. Zusätzlich wurden vor und nach dem Lauf der Knee Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) und der Tegner Score abgefragt. Zudem wurde die MME mittels Ultraschall in liegender und stehender Position, d.h. unter Belastung mit vollem Körpergewicht, gemessen. Der Ultraschall wurde nach der 1., 3., und 7. Etappe wiederholt. Um die Reversibilität der Extrusion zu evaluieren, wurde die MME zwei Wochen nach dem Rennen erneut gemessen. Bei allen Ultraschallmessungen wurde auch der Schmerz anhand der Visuellen Analogskala (VAS) abgefragt.

Insgesamt 18 Athleten (5 weiblich, 13 männlich) mit einem durchschnittlichen Alter von $37,4 \pm 8,3$ Jahre und einem durchschnittlichen BMI von $21,4 \pm 1,3$ kg/m² wurden eingeschlossen. Die durchschnittliche MME im Ultraschall betrug vor dem Rennen in liegender Position $1,6 \pm 0,3$ mm und in stehender Position $2,2 \pm 0,4$ mm. Während dem Rennen stieg die MME signifikant an und betrug bei den Messungen nach der letzten Etappe im Liegen $2,7 \pm 0,7$ mm ($p < 0,001$) und im Stehen $3,1 \pm 0,6$ mm ($p < 0,001$). Nach zwei Wochen Erholung zeigte sich eine vollständige Reversibilität der MME. Es war kein Zusammenhang zwischen der MME und der VAS zu finden. Auch zum KOOS gab es keine Korrelation.

Die extreme Belastung durch einen Ultramarathon resultierte in einer MME von mehr als 3 mm in gesunden, symptomfreien Knien. Dies zeigt, dass der Meniskus eine enorme elastische Kapazität hat und sich kurzfristig an höhere Belastungen anpassen kann. Diese Anpassungen zeigten sich bei Patienten mit gesunden Menisken nach einer Erholungsphase vollkommen reversibel. Daher sollte der aktuelle Begriff der Meniskusextrusion nicht ausschließlich als Zeichen einer Pathologie in der MRT-Untersuchung bewertet werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Laufen und Knie	1
1.2 Meniskus	3
1.2.1 Anatomie	3
1.2.2 Histologie	4
1.2.3 Funktion	6
1.3 Meniskusextrusion	7
1.3.1 Allgemeines	7
1.3.2 Evaluierung der Meniskusextrusion	9
1.3.3 Meniskusextrusion unter Belastung	9
1.4 Fragestellung und Hypothesen	11
2 Methodik	12
2.1 Ultramarathon und Rekrutierung	12
2.2 Ablauf der Studie	13
2.3 Klinische Untersuchung	13
2.4 Fragebögen	14
2.4.1 Visuelle Analogskala	14
2.4.2 Tegner Aktivitätsskala	14
2.4.3 Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score	15
2.4.4 Fragebogen zur Erfassung von Lauf- und Knievorgeschichte	15
2.5 Ultraschall	15
2.6 Magnetresonanztomographie	17
2.7 Statistische Auswertung	17
3 Ergebnisse	19
3.1 Probanden	19
3.1.1 Untersuchungszeitpunkte	19
3.1.2 Demographische Daten	19
3.1.3 Voroperationen	20

3.1.4	Trainingsprofil der Probanden	20
3.2	Klinische Untersuchung	21
3.3	Fragebögen	21
3.3.1	Tegner Aktivitätsskala	21
3.3.2	Visuelle Analogskala	22
3.3.3	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score	23
3.4	Magnetresonanztomographie	23
3.5	Ultraschall	23
4	Diskussion	27
4.1	Meniskusextrusion physiologisch	27
4.2	Asymptomatische Meniskusverletzungen	27
4.3	Grenzwert zu pathologischer Meniskusextrusion	28
4.4	Dynamische Beurteilung der Meniskusextrusion	29
4.5	Histologie und Meniskusextrusion	29
4.6	Laufen und Arthrose	30
4.7	Limitationen	30
4.8	Klinischer Bezug	31
4.9	Ausblick	31
5	Schlussfolgerungen	33
	Literaturverzeichnis	34
	Anhang	43
	Danksagung	50

Abbildungsverzeichnis

1.1	Menisken in der Sicht von oben	3
1.2	Vaskuläre Versorgung des Meniskus	4
1.3	Verlauf der Kollagenfasern in den verschiedenen Schichten	5
1.4	Kraftübertragung über Meniskus	7
1.5	Skizze eines normalen und eines extrudierten Meniskus	8
2.1	Etappen 1, 3 und 7 im Streckenverlauf mit Höhenprofil	13
2.2	Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen	14
2.3	Ultraschallmessung während des TAR	16
2.4	Bestimmung der MME aus dem Ultraschallbild	16
3.1	Wöchentliche Trainingskilometer je Proband vor dem TAR	20
3.2	Dauer des intensiven Laufsports in Jahren	20
3.3	Tegner Aktivitätsskala	22
3.4	VAS vor, während und nach dem TAR	22
3.5	MME liegend vor, während und nach dem TAR	24
3.6	MME stehend vor, während und nach dem TAR	24
3.7	MME im Ultraschallbild: a) vorher, b) nach Etappe 7, c) nachher	26

Tabellenverzeichnis

2.1	Überblick über die Details der 7 Etappen des TAR	12
3.1	Anzahl der einbezogenen Probanden nach Messpunkt	19
3.2	Charakteristika der Probanden	20
3.3	Weitere Sportarten der Probanden	21
3.4	KOOS vor und nach dem TAR	23
3.5	MME in mm vor und während dem TAR mit Signifikanzwerten	25
3.6	p-Werte und KK von VAS zu MME in mm	25

Abkürzungsverzeichnis

BMI	Body-Mass-Index
DNA	Desoxyribonukleinsäure
EZM	extrazelluläre Matrix
FoV	Field-of-View
HKB	Hinteres Kreuzband
Hm	Höhenmeter
ICRS	International Cartilage Repair Society
IKDC	International Knee Documentation Comitee
KK	Korrelationskoeffizient
KOOS	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score
MCL	mediales Kollateralband
MME	mediale Meniskusextrusion
MRT	Magnetresonanztomographie
PACS	Picture Archiving and Communication System
SD	Standardabweichung
TAR	Gore-Tex [®] Transalpine Run
VAS	Visuelle Analogskala
VKB	Vorderes Kreuzband

1 Einleitung

1.1 Laufen und Knie

In Deutschland betreiben nach Zahlen von 2012 ungefähr 25% der Bevölkerung über 16 Jahren Laufsport (Scheerder, 2015, S.122). Laufen hat viele positive Auswirkungen auf den Körper. Unter anderem vermindert es die Mortalität (Lee et al., 2014), verbessert den Cholesterinhaushalt, reduziert den Body-Mass-Index (BMI) (Hespanhol Junior et al., 2015) und verringert das Risiko von Diabetes Mellitus und Bluthochdruck (Williams & Thompson, 2013). Die Folgen des Laufens für das Knie sind jedoch ungeklärt. Der Zusammenhang zwischen Laufsport und Arthrose im Knie ist umstritten (Timmins et al., 2017). Bewiesen ist mittlerweile, dass Laufen auf Wettkampfniveau und auf langen Strecken mit einem höheren Gonarthrosrisiko verbunden ist, als kein Laufen oder Laufen auf Freizeitniveau (Alentorn-Geli et al., 2017; Driban et al., 2017). Die Abgrenzung zwischen Freizeit- und Wettkampfläufer ist jedoch schwierig.

Gonarthrose wird definiert als eine degenerative, nichtentzündliche Veränderung des Kniegelenks. Der Verlust von Knorpel spielt dabei eine große Rolle. Zudem wird der subchondrale Knochen beschädigt (van der Kraan, P. M., 2012; Lüring et al., 2011). Die Prävalenz von radiologisch diagnostizierter Arthrose beläuft sich auf 24,3% bei Männern und auf 32,6% bei Frauen. Mit dem Alter steigt die Anzahl der Betroffenen (Spahn et al., 2011). Risikofaktoren für die Entstehung einer Arthrose sind unter anderem eine ungerade Beinachse, Übergewicht, unterschiedliche Beinlängen, Verletzungen in der Vorgeschichte und eine Belastung des Gelenkes über viele Jahre (Glyn-Jones et al., 2015). Gonarthrose schränkt die Lebensqualität der Betroffenen stark ein. Der Schmerz und die Steifheit des Gelenkes führen zu massiven Behinderungen in Alltag und oft müssen Patienten ihren Sport aufgeben. Linderung verschafft in vielen Fällen nur noch eine Operation (Litwic et al., 2013). Zudem ist die Arbeitsfähigkeit zeitweise oder auch dauerhaft eingeschränkt, was zu hohen sozioökonomischen Kosten führt (Liebers et al., 2013; Glyn-Jones et al., 2015).

Arthrose entsteht entweder durch übermäßige Belastung auf einem normalen Gelenk oder durch normale Belastung auf einem eingeschränkten Gelenk (Goldring & Goldring, 2007). Die Gelenke der unteren Extremität werden beim Laufen einer hohen Belastung ausgesetzt. Die Belastung entspricht dabei ca. dem fünffachen des Körpergewichtes (Bergmann et al., 1993). Das würde dafür sprechen, dass es durch Laufen - übermäßige Belastung - zu einer Arthrose im Knie kommen kann. Für den Knorpel ist Belastung aber auch protektiv.

Neben dem Knorpel spielt auch der Meniskus eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Arthrose. Der Verlust der Meniskusfunktion führt zu einer Druckerhöhung in Gelenk und Knorpel und somit langfristig zu einer Präarthrose (Allaire et al., 2008). Stein et al. (2010) konnten zeigen, dass es ohne Meniskus bzw. funktionierenden Meniskus vermehrt zu Arthrose kommt. Entsprechend können sowohl eine Veränderung des Knorpels als auch der Verlust der Meniskusfunktion für eine beginnende Arthrose des Kniegelenkes verantwortlich sein. Extrembelastungen wie zum Beispiel übermäßiger Sport oder Laufen können hierfür verantwortlich sein. Beide Strukturen kann man gut in der Magnetresonanztomographie (MRT) evaluieren (Kessler et al., 2006).

Die Datenlage zu akuten Veränderungen am Knie im MRT bedingt durch das Laufen ist jedoch inkonsistent. Die meisten Studien, in denen Bilder weniger als 15 min nach Ende eines Laufes akquiriert wurden, zeigen signifikante Ergebnisse (Hoessly & Wildi, 2017). Es gibt verschiedene Möglichkeiten Menisken und Knorpel im MRT zu beurteilen, wie zum Beispiel: die Dicke oder das Volumen bestimmen (Kessler et al., 2006, 2008; Hinterwimmer et al., 2014), die Relaxationszeiten vergleichen (Subburaj et al., 2012), die Signalintensität bewerten (Karanfil et al., 2018) oder direkt nach Schäden suchen (Schueller-Weidekamm et al., 2006a). Schueller-Weidekamm et al. (2006a, 2006b) untersuchten Knie mittels MRT auf chronische und akute Veränderungen durch das Laufen. Sie stellten fest, dass bei Läufern mit höherem Trainingspensum mehr Schäden im Knie zu finden sind als bei Läufern mit niedrigerem Trainingspensum. Es wurden mehr Veränderungen an Menisken, Knorpel und Vorderem Kreuzband (VKB) festgestellt. Als akute Veränderungen wurden nach einem Marathon vergrößerte Gelenksergüsse und Signalalterationen im Meniskus gefunden. Zudem führt Laufen zu einer Verkleinerung des Meniskus- und Knorpelvolumens. Die Länge der Laufstrecke korreliert dabei mit der Verminderung des Volumens beider Strukturen (Kessler et al., 2006). Eine Stunde nach Ende der Belastung hatten sie wieder das Ausgangsvolumen angenommen. Für die Menisken war dies aber nur grenzwertig der Fall (Kessler et al., 2008). Hinterwimmer et al. (2014) konnten bei Sportlern ohne Marathonerfahrung in Untersuchungen vor dem sechsmonatigem Training und einen Tag nach dem Marathon eine Abnahme von Volumen und Dicke des Knorpels im lateralen Kompartiment evaluieren.

Eine andere Studie zeigte, dass die Relaxationszeiten im MRT nach dem Laufen im Knorpel und in den Hörnern der Menisken signifikant verkleinert waren. Die oberflächliche Schicht des Knorpels zeigte dabei die größte Veränderung (Subburaj et al., 2012). Durch das Laufen sinkt die Signalintensität in T2 im Knorpel. In den Bereichen direkt unterhalb der Menisken ist dies nicht der Fall (Karanfil et al., 2018).

Somit besteht ein unmittelbarer Zusammenhang von übermäßiger sportlicher Betätigung und Veränderungen von Meniskus und Knorpel, welche sich auch bildgebend nachweisen lassen.

1.2 Meniskus

1.2.1 Anatomie

Der Meniskus ist ein mondförmiger Keil aus Faserknorpel. Er liegt direkt auf dem Tibiaplateau auf und ist daran auch befestigt (Fox et al., 2015). Er gleicht die Inkongruenz zwischen konvexen Femurkondylen und dem planen Tibiaplateau aus (Messner & Gao, 1998). Im Querschnitt ist der Meniskus dreieckig, wobei innen die dünne Kante und außen die breite Basis ist. Die Außenseite ist mit der Gelenkkapsel verbunden (Rath & Richmond, 2000). Die anatomische Lage und Umgebung der Menisken ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

Es gibt einen lateralen und einen medialen Meniskus. Der mediale Meniskus hat eine C-Form und der laterale Meniskus ist eher kreisförmig. Der mediale Meniskus ist größer und weniger beweglich. Das Hinterhorn des medialen Meniskus ist weiter als das Vorderhorn (Fox et al., 2015). Beide Menisken sind über Insertionen im subchondralen Knochen verankert (Messner & Gao, 1998). Das anteriore Horn des medialen Meniskus inseriert vor dem VKB variabel in die vordere Tibia. Ein Großteil der Menschen hat den vorderen Insertionspunkt im flachen Interkondylargebiet, weniger haben ihn etwas weiter medial in der Abflachung oder weiter anterior (Berlet & Fowler, 1998). Das posteriore Horn hat seine Befestigung direkt vor dem

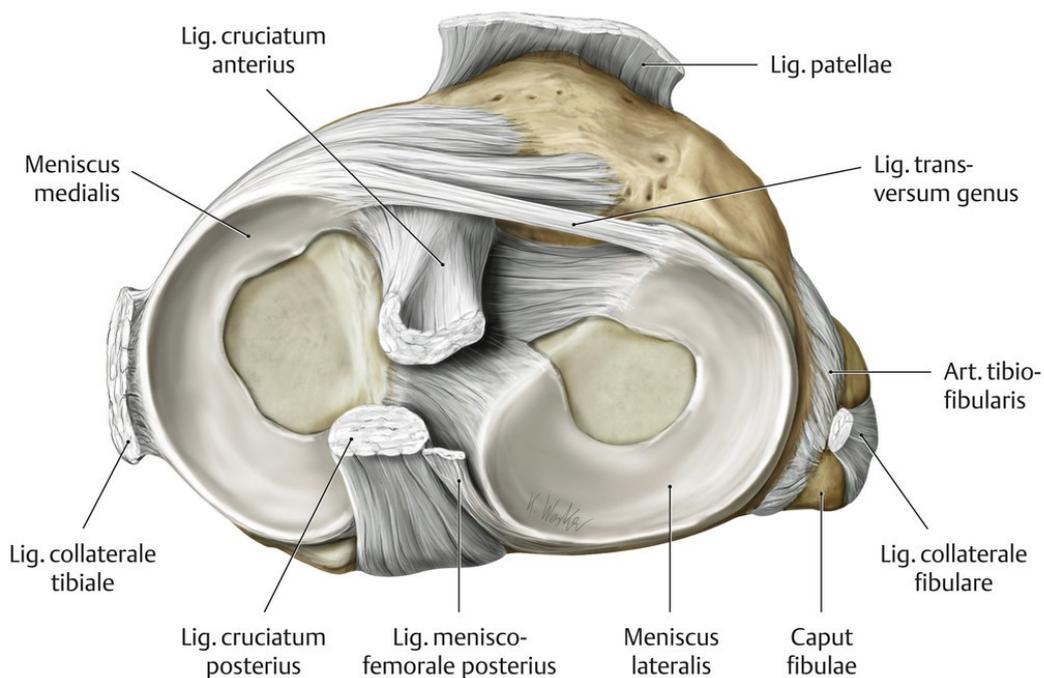


Abbildung 1.1: Menisken in der Sicht von oben (Schünke et al., 2011, S. 446)

hinteren Kreuzband (HKB) (Rath & Richmond, 2000). Der mediale Meniskus ist zudem mit dem medialen Kollateralband (MCL) verwachsen. Das erklärt zum Teil den geringeren Grad der Beweglichkeit des medialen Meniskus. Der zweite Grund dafür ist, dass seine Insertionspunkte weiter von einander entfernt liegen als die des lateralen Meniskus (Schünke et al., 2011, S. 446).

Die vaskuläre Versorgung des Meniskus übernehmen Äste der Arteria poplitea (laterale, mediale und mittlere Arteria geniculata). Die Blutgefäße dringen ausgehend von einem perimeniskalem Plexus in Intervallen in den Meniskus ein. Am besten werden dabei die Hörner versorgt (Day et al., 1985). Die Durchblutung ist dabei aber auf die äußeren 10 bis 30% des Meniskus begrenzt. Diese Zone wird auch als rote Zone bezeichnet. Zusätzlich gibt es noch die rot-weiße Zone, welche als Übergangsbereich klassifiziert wird, und die weiße Zone (Arnoczky & Warren, 1982). Letztere wird nur durch synoviale Diffusion und mechanische Bewegung versorgt (Schünke et al., 2011, S. 446). Die drei Zonen sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Die Einteilung der verschiedenen Zonen hat vor allem eine Bedeutung in der Meniskuschirurgie, da sie gleichzeitig Aussagen zum Heilungspotential macht. Nähte oder Risse in der roten Zone heilen voraussichtlich gut, in der weißen eher nicht (Arnoczky & Warren, 1983).

1.2.2 Histologie

Die Art der Zellen im Meniskus wird kontrovers diskutiert. In der weißen Zone des Meniskus gibt es vor allem runde, chondrozytenartige Zellen. In der roten Zone treten vermehrt Fibroblasten auf. Diese sind spindelförmig. Im oberflächlichen Bereich gibt es noch eine dritte Zellart. Diese Zellen sind platt, polygonal und ohne Zellausdehnung (Nakata et al., 2001). Zu dieser Zellart gibt es die Vermutung, dass sie regenerative Fähigkeiten besitzt, welche die

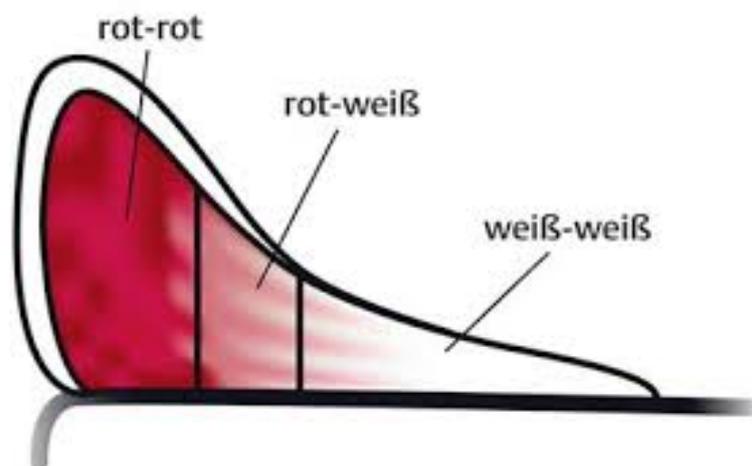


Abbildung 1.2: Vaskuläre Versorgung des Meniskus (Dürselen & Freutel, 2015, S. 216)

Heilung im Meniskus beeinflussen könnte (van der Bracht et al., 2007).

Der Meniskus hat neben Zellen eine dichte extrazelluläre Matrix (EZM). Diese setzt sich aus 72% Wasser, 0,12% Desoxyribonukleinsäure (DNA), 20% Kollagen und 0,8% Glykosaminoglykanen zusammen. Diese Verteilung variiert jedoch je nach Grad der Degeneration und Alter. Im Alter nimmt der Anteil an Wasser zu, wohingegen die Menge an Kollagen und Proteoglykanen abnimmt (Herwig et al., 1984). Die Insertionen setzen sich aus Fibroblasten, Kollagen Typ I und Proteoglykanen zusammen (DePhillipo et al., 2019). Diese Bereiche teilen sich in unkalzifizierten und kalzifizierten Faserknorpel und Knochen auf (Benjamin et al., 1991). Im Vorderhorn gibt es zusätzlich noch eine ligamentöse Zone (Gao et al., 1994).

Die Kollagenfasern sind für die Zugkraft zuständig. Vom Trockengewicht sind 70% im inneren und 80% im äußeren Teil des Meniskus die Kollagenfasern. Im inneren Drittel des Meniskus sind Kollagenfasern zu 40% Typ I und zu 60% Typ II. In den äußeren zwei Dritteln sind es fast zu 100% Typ I Fasern. Zudem wurden noch Spuren von Typ III und IV in letzteren gefunden (Cheung, 1987). Man kann den Meniskus nach dem Verlauf der Kollagenfasern in Schichten einteilen. In der oberflächlichen Schicht sind es dünne Fibrillen (35 nm), die keiner bestimmten Ausrichtung folgen. Diese Schicht ist ca. 10 µm breit. Die Schicht darunter besteht aus etwas dickeren Fibrillen (120 nm), die zu Bündeln angeordnet sind. Diese überschneiden sich mit variierenden Winkeln und formen eine Dicke von ca. 150 µm. Die innere Schicht bildet den Hauptteil des Meniskus. Diese Kollagenfibrillen (120 nm) sind in Bündeln zirkulär angeordnet. Dabei gibt es eine äußere und eine innere Zirkumferenz. Zwischen den Bündeln gibt es zusätzlich noch radiäre Faserbündel. Diese stabilisieren

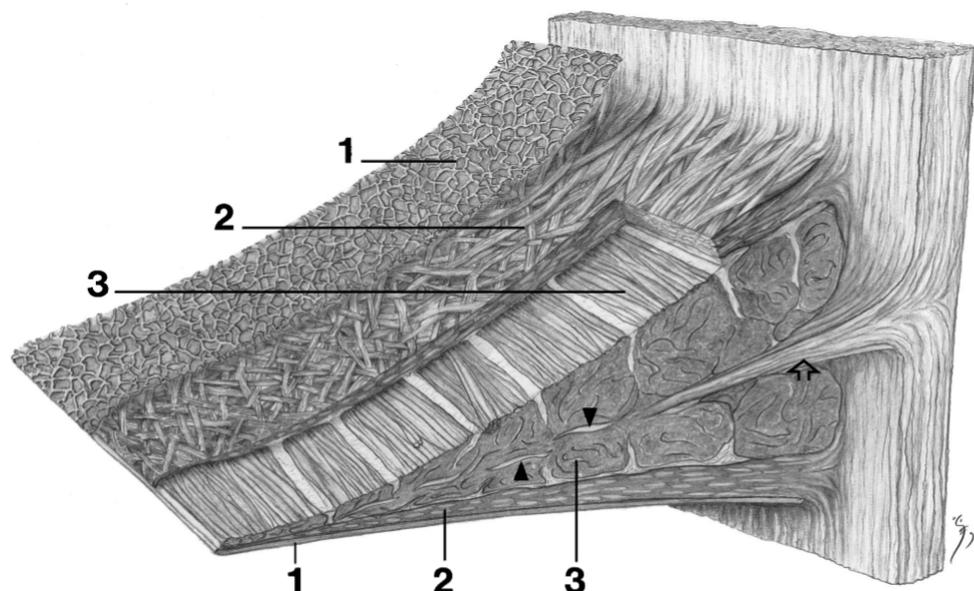


Abbildung 1.3: Verlauf der Kollagenfasern in den verschiedenen Schichten (Petersen & Tillmann, 1998b)

die zirkumferenten Bündel. Außerdem sorgen die von der oberflächlichen Schicht einstrahlenden vertikalen Fasern für Stabilität (Petersen & Tillmann, 1998b, 1998a). Dargestellt ist der Schichtaufbau in Abbildung 1.3.

1.2.3 Funktion

Der Meniskus hat mehrere für das Knie wichtige Funktionen. Teilweise liegt die Grundlage für diese Funktionen darin, dass der Meniskus die Inkongruenz im Knie ausgleicht. Damit wird die Kontaktfläche zwischen Femur und Tibia vergrößert. Dies führt dazu, dass sich der Kontaktdruck pro Flächeneinheit verringert (Kettelkamp & Jacobs, 1972; Walker & Erkman, 1975; Fukubayashi & Kurosawa, 1980). Ohne Meniskus kommt es deshalb zu einem erhöhten Druck auf den Knorpel (Radin et al., 1984). Das führt schneller zu einer degenerativen Veränderung im Knie (Fairbank, 1948).

Die primäre Funktion des Meniskus ist die Kraftübertragung von Femur auf Tibia. Unter Belastung werden mindestens 50% der Kraft über den Meniskus geleitet. Dabei wird in der lateralen Hälfte des Knies mehr Kraft über den Meniskus übertragen als auf der medialen Seite (Shrive et al., 1978). In Flexion werden ca. 90% der Kraft über die Menisken übertragen (Walker & Erkman, 1975). Die axiale Kraft komprimiert den Meniskus und wird in Zugkräfte umgewandelt (Shrive et al., 1978). Diese verlaufen zirkumferent im Meniskus. Die Ringspannung wird dabei durch die Kollagenfasern, welche in gleiche Richtung verlaufen, gehalten (Krause et al., 1976). Zudem wird der Meniskus nach außen gedrückt. Somit kann die Druckbelastung auf einer größeren Fläche an die Tibia weitergeben werden (Jones et al., 1996; Sweigart & Athanasiou, 2001). Dies ist in Abbildung 1.4 dargestellt.

Eine weitere Funktion ist die Verbesserung der Stabilität im Knie (Walker & Erkman, 1975). Die Menisken hemmen die anteriore tibiale Translation, wenn das VKB nicht intakt ist. Dabei trägt der laterale Meniskus vor allem in der Pivot-Shift-Bewegung zur Stabilität bei (Bargar et al., 1980; Musahl et al., 2010). Ob der Meniskus auch bei einem intaktem VKB zur Verbesserung der Stabilität beiträgt, ist umstritten. Über die Propriozeption könnte der Meniskus trotzdem einen wichtigen Beitrag zur Stabilität des Kniegelenks leisten (Aagaard & Verdonk, 1999).

Propriozeptive Nervenfasern befinden sich vor allem in Vorder- und Hinterhorn des Meniskus (Wilson et al., 1969). Neueren Studien zufolge hat nur das Hinterhorn propriozeptive Fasern. Bei Stimulation dieser kommt es zu einer Kontraktion des Musculus semimembranosus (Saygi et al., 2005). Es gibt verschiedene Mechanorezeptoren im Meniskus: Vater-Pacini-Körperchen, Ruffini-Körperchen und Golgi-Apparate (Zimny, 1988). Vater-Pacini-

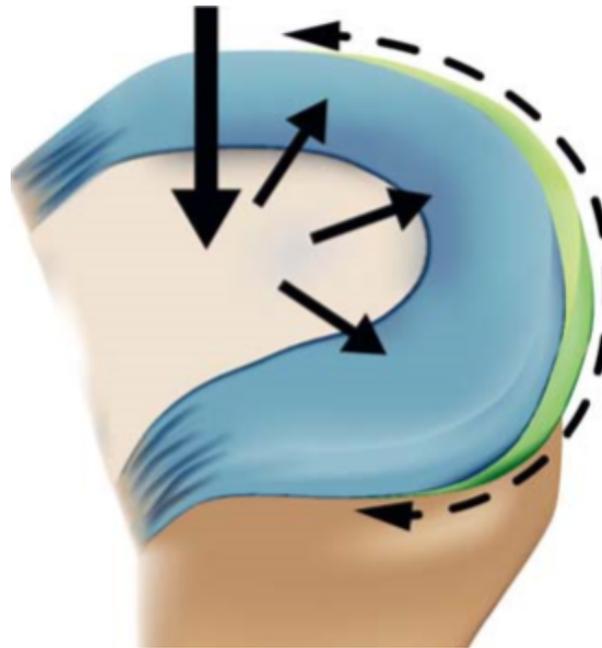


Abbildung 1.4: Kraftübertragung über Meniskus: axiale Druckbelastung in zirkumferente Zugspannung (Dürselen & Freutel, 2015, S. 217)

Körperchen sind schnell adaptierende Mechanorezeptoren. Es wird vermutet, dass sie Bewegungen des Gelenks wahrnehmen. Die zwei anderen sind langsam adaptierend und vermutlich für die Bestimmung der Gelenkposition zuständig (Reider et al., 2003).

Weitere Funktionen des Meniskus sind die Versorgung des Knorpels und die Verminderung der Reibung im Gelenk. Der Meniskus hilft die Synovialflüssigkeit gleichmäßig zu verteilen. Das passiert durch seine Bewegungen nach vorne und hinten bei Wechsel von Extension in Flexion und umgekehrt (Macconail, 1932, 1950). Während Druckbelastungen wird Flüssigkeit aus dem Meniskus gedrückt (Renström & Johnson, 1990). Bird und Sweet (1987) entdeckten Kanäle innerhalb des Meniskus. Vermutet wird, dass diese auch dem Transport von Synovialflüssigkeit und somit der Ernährung dienen. Ohne Meniskus erhöht sich die Reibung im Gelenk um 20% (Macconail, 1950).

1.3 Meniskusextrusion

1.3.1 Allgemeines

Meniskusextrusion wird definiert als ein Herausragen des Meniskus über die Kante des Tibiaplateaus (Trattnig et al., 2014, S. 212) sowie als ein Funktionsverlust des Meniskus (Allaire et al., 2008). In Abbildung 1.5 ist eine Skizze einer Meniskusextrusion neben einem nicht extrudierten Meniskus zu sehen.

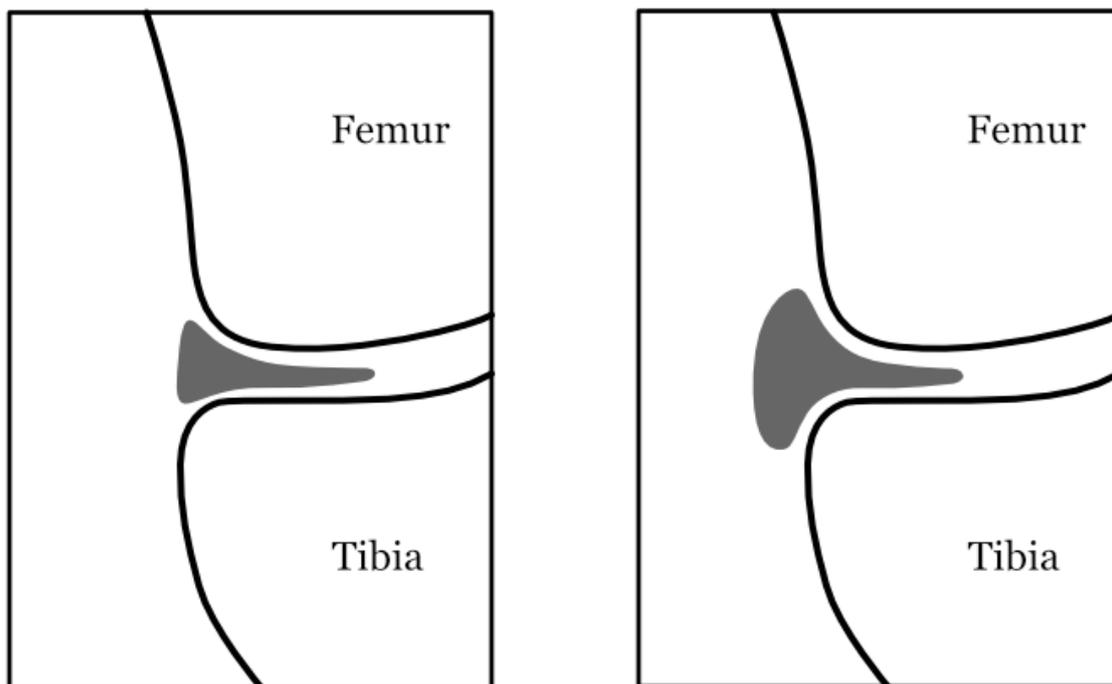


Abbildung 1.5: Skizze eines normalen und eines extrudierten Meniskus

Ursächlich werden hierfür diverse Pathologien diskutiert. Die Abgrenzung zwischen physiologischer und pathologischer Meniskusextrusion ist schwierig. Gemessen im MRT wird eine Extrusion größer als 3 mm als eine pathologische Meniskusextrusion definiert (Costa et al., 2004; Choi et al., 2010). Eine neuere Studie schlägt jedoch einen Grenzwert von 4 mm vor (Svensson et al., 2019). Zu den Pathologien, welche mit Meniskusextrusion assoziiert sind, zählen vor allem Meniskusrisse, Meniskusverlust und Arthrose. Auch eine ungerade Beinachse kann zu einer Meniskusextrusion führen (Crema et al., 2012).

Pagnani et al. (1991) beschrieben erstmals einen Fall, bei dem eine große Meniskusextrusion mit einer Läsion des Meniskushinterhorns assoziiert war. Außer Rissen des Hinterhorns (Choi et al., 2010) bzw. der Meniskuswurzel (Allaire et al., 2008) können auch andere Risskonfigurationen Ursache einer Meniskusextrusion sein (Costa et al., 2004).

Des Weiteren tritt Meniskusextrusion häufig in Verbindung mit Arthrose auf (Crema et al., 2012). Es wird vermutet, dass Meniskusextrusion eine Ursache für Arthrose sein kann (Sugita et al., 2001). Wenn der tibiale Knorpel nicht mehr ausreichend bedeckt ist, kommt es zu einem höheren Druck in dem Bereich, in dem Femur und Tibia aufeinandertreffen. Das führt zu einer Degeneration des Knorpels und auf Dauer zu Arthrose (Luczkiewicz et al., 2015; Liu et al., 2017). Mit der Meniskusextrusion kann man auch das Fortschreiten der

Arthrose beobachten (Kawaguchi et al., 2012; Chiba et al., 2017).

Im Kontrast zu den Pathologien gibt es aber auch eine physiologische Meniskusextrusion. Diese steigt mit steigendem BMI und Alter (Achnich et al., 2018). Bei Frauen ist die Meniskusextrusion im Durchschnitt höher. Belastung kann auch zu einer erhöhten Meniskusextrusion führen, weil es den Meniskus komprimiert und nach außen drückt (Patel et al., 2016). Ein Beispiel dafür ist eine Messung im Stehen. Dabei wird der Meniskus mit dem eigenen Körpergewicht belastet (Verdonk et al., 2004; Achnich et al., 2018).

1.3.2 Evaluierung der Meniskusextrusion

Die Meniskusextrusion lässt sich sowohl mit dem MRT als auch mit dem Ultraschall bestimmen. Beide Untersuchungen sind nicht invasiv. Die Bestimmung der Meniskusextrusion im Ultraschall ist gleichwertig zur Bestimmung im MRT (Nogueira-Barbosa et al., 2015). Die mediale Meniskusextrusion lässt sich im Ultraschall mit einer höheren Genauigkeit bestimmen als die laterale (Podlipská et al., 2016).

MRT ist das Standardverfahren für die Bestimmung der Meniskusextrusion (Crema et al., 2012). Im MRT kann man den Meniskus in mehreren Ebenen darstellen (Naredo et al., 2005). Damit kann man die Meniskusextrusion an verschiedenen Stellen messen, unter anderem an den Hörnern. Das MRT hat außerdem eine sehr gute Auflösung (Verdonk et al., 2004). Die Reproduzierbarkeit der Messung ist dabei hoch (Naredo et al., 2005). Von Nachteil ist jedoch, dass die MRT-Untersuchung teuer und zeitaufwendig ist (Podlipská et al., 2016). Außerdem ist ein großer Nachteil, dass es keine belasteten Bilder gibt.

Mit Ultraschall können Bilder deutlich schneller akquiriert werden. Zudem sind Ultraschallgeräte in Deutschland weit verbreitet und teilweise portabel (Kawaguchi et al., 2012). Die Belastung mit dem eigenen Körpergewicht ist ohne weitere Schwierigkeiten möglich (Verdonk et al., 2004; Achnich et al., 2018). Im MRT kann man nur unter großem Aufwand belastete Messungen durchführen (Stehling et al., 2012; Patel et al., 2016). Ein Nachteil des Ultraschalls ist, dass die Ergebnisse abhängig vom Untersucher sind. Außerdem hat das Messen mit dem Ultraschall eine langsame Lernkurve (Naredo et al., 2005).

1.3.3 Meniskusextrusion unter Belastung

Verdonk et al. (2004) war der erste, der den Meniskus unter Belastung mit dem Ultraschallgerät beurteilte. Er fand dabei aber keine signifikante Differenz zwischen der belasteten und der unbelasteten Messung.

Kawaguchi et al. (2012) zeigte, dass sowohl in gesunden Knien als auch in Knien bei Patienten mit Arthrose der Grade 1-3 nach Kellgren und Lawrence (Kellgren, 1957) die Meniskusextrusion unter Belastung größer war als ohne Belastung. Die Messungen wurden dabei im Liegen und Stehen mit dem Ultraschall durchgeführt. Bei Grad 4 nach Kellgren und Lawrence kam es jedoch zu keiner signifikanten Veränderung zwischen der belasteten und der unbelasteten Messung.

Studien mit Messungen der Meniskusextrusion in belasteter und unbelasteter Situation im MRT kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Patel et al. (2016) fanden eine signifikante Vergrößerung der Meniskusextrusion unter Belastung, jedoch nur auf der medialen Seiten. Stehling et al. (2012) fanden eine signifikante Vergrößerung der Meniskusextrusion nur in Verbindung mit Schäden oder Verletzungen im Knie und diese nur auf der medialen Seite. Auf der lateralen Seite konnten beide keine signifikante Veränderung der Meniskusextrusion im Stehen feststellen.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der Meniskusextrusion zwischen einer pathologischen (Meniskusrisse, Arthrose) und einer physiologischen (BMI, Alter, Geschlecht) unterschieden werden.

1.4 Fragestellung und Hypothesen

Ziel dieser Studie war es, die elastische Kapazität und die Funktion des Meniskus unter Extrembelastung zu beurteilen. Dafür wurde die Meniskusextrusion im Ultraschall bestimmt, sowohl unbelastet als auch belastet. Die Meniskusextrusion wurde vor, während und nach der Extrembelastung in gesunden Knien untersucht.

Den Hintergrund dieser Studie bilden zwei verschiedene Ansätze. Zum einen geht es dabei um die Funktion des Meniskus. Die kraftübertragende Wirkung im Knie ist belegt, aber der genaue Mechanismus ist noch nicht endgültig evaluiert. Neue Studien zeigen, dass es eine physiologische Meniskusextrusion unter Belastung durch das Körpergewicht gibt. Die histologische Zusammensetzung aus Kollagenfasern und Wasser spielt dabei vermutlich eine Rolle. Zum anderen wird vermutet, dass Laufen unter hohen Belastungen zu Arthrose im Knie führt. Der Zusammenhang zwischen Laufen und Arthrose ist allerdings noch nicht im Detail geklärt.

Mit dieser Studie soll gezeigt werden, dass es eine belastungsinduzierte Meniskusextrusion in gesunden Knien gibt und dass der Meniskus sich an hohe Belastungen anpassen kann. Außerdem soll das Regenerationspotential des Meniskus gezeigt werden. So kann möglicherweise die Funktion des Meniskus sowie der Zusammenhang zwischen Laufsport und Arthrose besser verstanden werden. Zudem könnte mit diesen Daten die Grenze zwischen pathologischer und physiologischer Meniskusextrusion in Frage gestellt werden.

Folgende Fragen wurden formuliert:

1. Führt Ultramarathon zu einer temporären Meniskusextrusion in gesunden Knien?

Hypothese: Ultramarathon führt zu einer temporären Meniskusextrusion größer als 3 mm in gesunden Knien.

2. Ist die Veränderung der Meniskusextrusion reversibel?

Hypothese: Nach der Belastung (Ultramarathon) sinkt die Meniskusextrusion auf das Anfangsniveau und ist somit reversibel.

2 Methodik

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Technischen Universität genehmigt (303/17 s) und nach den Grundsätzen der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Alle Probanden gaben nach Aufklärung über die Risiken, die Ein- und Ausschlusskriterien und die Ziele der Studie ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme. Die Studie wurde als prospektive Längsschnittstudie durchgeführt. Die Daten wurden zwischen dem 11.08.2017 und dem 05.10.2017 erhoben.

2.1 Ultramarathon und Rekrutierung

Als Extrembelastung wurde der Gore-Tex® Transalpine Run (TAR) 2017 ausgewählt, der vom 3. bis zum 9. September stattfand. Dieser Ultramarathon bestand aus sieben Etappen über die Alpen. Der Lauf führte von Fischen im Allgäu, Deutschland, nach Suldén am Ortler, Italien. Die Gesamtdistanz betrug 270,5 km und die Höhenmeter (Hm) im Aufstieg 16.453 m. Im Durchschnitt sind es pro Etappe ungefähr 40 km und 2500 Hm in Auf- und Abstieg. Die Details der einzelnen Etappen sind in Tabelle 2.1 zu finden. In Abbildung 2.1 sind beispielhaft die Höhenprofile und Strecken dreier Etappen dargestellt.

Etappe	Distanz in km	Aufstieg in Hm	Abstieg in Hm
1	45,0	2083	1469
2	24,7	1899	2042
3	39,6	2658	3133
4	45,7	2861	1829
5	37,1	2064	2711
6	44,4	1633	1924
7	34,0	3255	2319
Gesamt	270,5	16453	15427

Tabelle 2.1: Überblick über die Details der 7 Etappen des TAR

Anfang August war Beginn der Rekrutierung der Probanden. Über den Veranstalter PLAN B wurde eine E-Mail an alle Teilnehmer des TAR versendet, deren Postleitzahl mit einer 8 begann. Diese enthielt unter anderem einen Anhang mit sämtlichen Informationen zur Studie, die Kontaktdaten der Studienbetreuer und die Einschlusskriterien. Zusätzlich wurde in die Facebookgruppe des TAR ein Eintrag mit dem gleichen Informationsblatt gemacht. Eingeschlossen wurden freiwillige Teilnehmer des TAR mit einem Alter über 18 Jahren und einem beschwerdefreien Knie ohne relevante Achsabweichung. Ausschlusskriterien waren

relevante Verletzungen in den letzten drei Monaten sowie eine Voroperation am untersuchten Knie.

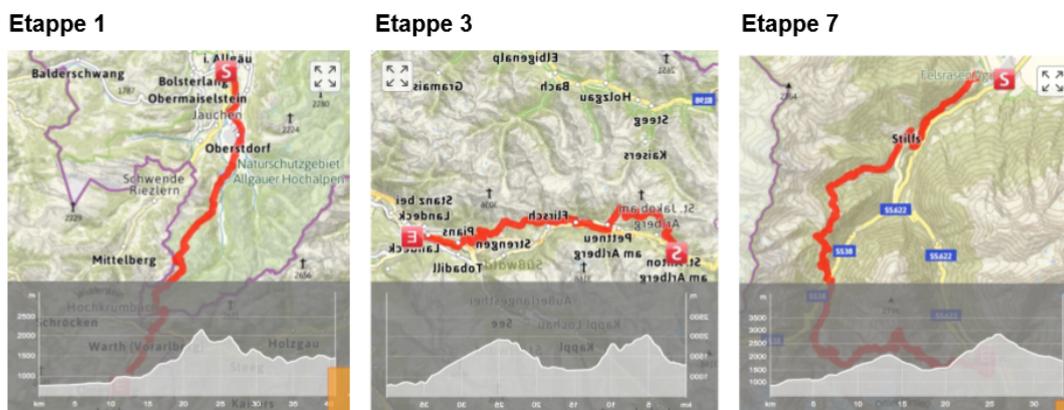


Abbildung 2.1: Etappen 1, 3 und 7 im Streckenverlauf mit Höhenprofil

2.2 Ablauf der Studie

Pro Proband wurde ein Knie in die Studie eingeschlossen. Das Knie wurde nach den Ein- und Ausschlusskriterien ausgewählt oder per Los. Gemessen wurde die mediale Meniskusextrusion (MME) im Ultraschall, sowohl liegend als auch stehend. Verschiedene klinische Scores wurden abgefragt und der Schmerz anhand der Visuellen Analogskala (VAS) (Price et al., 1983) erfasst. Um eventuelle Pathologien auszuschließen, wurde eine klinische Untersuchung durchgeführt. Zudem wurde bei der Voruntersuchung ein MRT zur Beurteilung des Kniestatus durchgeführt.

Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Untersuchungen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Voruntersuchungen fanden im Zeitraum von 4 Wochen bis ein paar Tage vor dem Ultramarathon statt. Die Nachuntersuchungen wurden Ende September durchgeführt, ungefähr zwei Wochen nach der letzten Etappe. Die Untersuchungen während des TAR wurden immer direkt im Anschluss an die Etappe durchgeführt. Dafür wurden die Probanden im Zielbereich nach Ankunft abgefangen und direkt untersucht. Gemessen wurde nach den Etappen 1, 3 und 7. Die Höhenprofile und Streckenverläufe dieser Etappen sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

2.3 Klinische Untersuchung

Alle Patienten wurden zuerst standardisiert am eingeschlossenen Knie untersucht. Für den Ablauf wurde das Formblatt des International Knee Documentation Comitee (IKDC) (Hefti



Abbildung 2.2: Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen

et al., 1993) benutzt. Zuerst wurde das Knie inspiziert und palpirt. Mit dem Test der tanzen-
den Patella wurde auf einen eventuellen Gelenkserguss untersucht. Bei der Palpation wurde
vor allem auf Druckschmerzen über dem medialen Gelenkspalt geachtet. Die Beweglichkeit
des Knies wurde mit der Neutral-Null-Methode (Seyfarth et al., 1973) dokumentiert und im
Seitenvergleich beurteilt. Die Stabilität der Kollateralbänder und der Kreuzbänder wurde ge-
testet. Dafür wurden die Tests Vordere Schublade und Hintere Schublade durchgeführt und
die seitliche Aufklappbarkeit geprüft. Danach wurden die Menisken mit dem McMurray Test
(McMurray, 1942) und dem Thessaly Test (Karachalios et al., 2005) untersucht.

2.4 Fragebögen

2.4.1 Visuelle Analogskala

Die VAS (Price et al., 1983) (s. Anhang) wurde abgefragt, um den Schmerz der Probanden
zu beurteilen. Diese Frage wurde vor und nach dem Lauf und nach den Etappen 1, 3 und 7
gestellt.

2.4.2 Tegner Aktivitätsskala

Des Weiteren wurde die Tegner Aktivitätsskala (Tegner & Lysholm, 1985) abgefragt, um zu
beurteilen auf welchem Niveau die Probanden Sport betrieben. Dabei teilen sich die Proban-
den in Aktivitätsgrade ein, die von 0 bis 10 gehen. 0 entspricht dabei eingeschränktem Gehen
oder wegen Knieproblemen arbeitsunfähig oder berentet zu sein. 10 heißt, dass der Proband
Fußball oder Ski alpin auf nationalem oder internationalem Wettkampfniveau betreibt. Der
gesamte Bogen ist im Anhang zu sehen.

2.4.3 Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score

Im Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) (Roos et al., 1998) wurde der subjektive Eindruck der Probanden von ihrem Knie vor und nach dem Lauf festgehalten. Der KOOS ist in die folgenden Kategorien unterteilt: Schmerz, Symptome, Aktivitäten des alltäglichen Lebens, Funktionsfähigkeit im Sport und in der Freizeit und Lebensqualität im Zusammenhang mit dem betroffenen Knie. Diese Kategorien werden getrennt voneinander bewertet. In jeder Kategorie gibt es unterschiedlich viele Fragen und pro Frage gibt es fünf Antwortmöglichkeiten, die mit Punkten von 0 bis 4 bewertet werden. 4 Punkte spricht für möglichst wenige bis gar keine Symptome und Einschränkungen. Maximal kann man in jeder Kategorie 100 Punkte erhalten. Bei 100 Punkte bestehen keine Einschränkungen und Probleme. Dieser Score wurde vor und nach dem Ultramarathon abgefragt, um mögliche Veränderungen mit der MME korrelieren zu können (s. Anhang).

2.4.4 Fragebogen zur Erfassung von Lauf- und Knievorgeschichte

Ein speziell für die Studie entworfener Fragebogen erhob Größe, Gewicht, Beginn des intensiven Laufsports, Anzahl der Läufe und Laufkilometer pro Woche, weitere Sportarten und eventuelle Voroperationen am Knie. Dieser Fragebogen ist im Anhang verfügbar.

2.5 Ultraschall

Der Ultraschall wurde mit einem 13,5 MHz linearen Ultraschallgerät (Arthrex® Synergy MSK™ Ultrasound) standardisiert durchgeführt. Als erstes wurde der Patient liegend mit einer Knierolle unter den Knien positioniert. Als Ausgangspunkt wurde die mediale Femurkondyle getastet und dort der Ultraschallkopf in longitudinaler Ausrichtung aufgesetzt. Aus dieser Position fuhr man mit dem Schallkopf bis zum Gelenkspalt. Zwischen medialer Femurkondyle und Tibiaplateau konnte man dann den Meniskus als dreieckige, echogene Struktur erkennen. Das MCL musste dabei im Faserverlauf parallel zum Schallkopf stehen. Die Stelle der Messung wurde dann am oberen und unteren Ende des Gerätes am Bein des Probanden markiert. Danach kam die Messung im Stehen, welche in Abbildung 2.3 gezeigt wird. Die stehende Messung wurde durchgeführt, um die MME unter Belastung zu messen. Dabei stand der Patient mit beiden Füßen in neutraler Position und die Knie waren ca. 20 Grad gebeugt. Zur Kontrolle, dass beide Beine gleich belastet werden, wurde die Stellung des Beckens und des Oberkörpers überprüft. Im Anschluss wurde der Schallkopf auf die zuvor markierte Stelle aufgesetzt und ein Bild aufgenommen. Diese Methode wurde von Achtnich et al. (2018) beschrieben.

Die Messung der MME wurde direkt im Anschluss an die Aufnahme gemacht. Dafür wurde



Abbildung 2.3: Ultraschallmessung während des TAR

die Methode von Nogueira-Barbosa et al. (2015) verwendet, welche in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Dazu zeichnet man eine longitudinale Linie entlang des medialen Tibiaplateaus und parallel dazu eine Linie am äußersten Rand des Meniskus. Die MME war dabei der Abstand zwischen den beiden Linien in Millimetern. Diese Messung wurde dann später nochmals am Computer wiederholt, um die Genauigkeit der Messergebnisse zu verbessern.

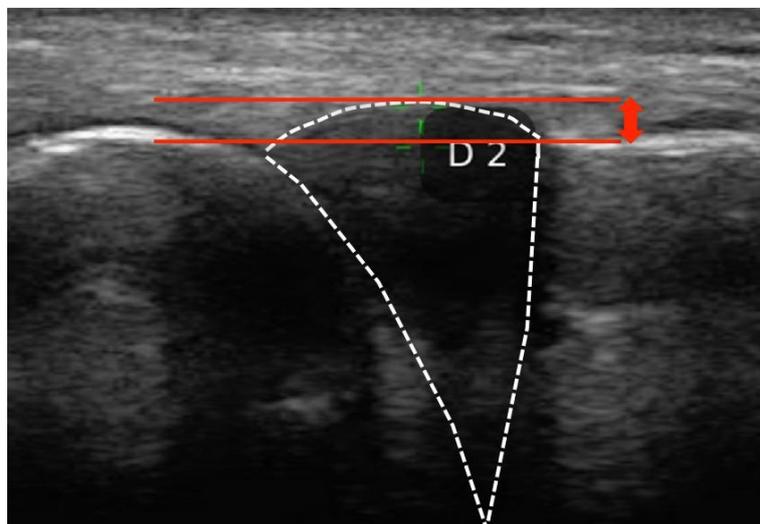


Abbildung 2.4: Bestimmung der MME aus dem Ultraschallbild

Nach Achtnich et al. (2018) ist die Intraklassenkorrelation (Koo & Li, 2016) dieser Methode gut bis exzellent. Es ergaben sich die Werte 0,783 CI [0,625;0,872] ($p < 0,001$) in liegender Position und 0,900 CI [0,820;0,942] ($p < 0,001$) in stehender Position.

2.6 Magnetresonanztomographie

Die MRT-Untersuchung wurde ausschließlich am Tag der Voruntersuchung durchgeführt. Damit wurde der Status des Knies erhoben. Vor der Untersuchung wurden die Patienten anhand eines Standardaufklärungsbogens über Risiken informiert und mussten schriftlich ihre Zustimmung geben.

Der Scan wurde mit einem klinischen 3,0 Tesla MRT Gerät (Ingenia, Philips Healthcare, Best, The Netherlands) durchgeführt. Die Bilder wurden dabei von einer erfahrenen MTRA akquiriert. Der Proband lag für die Untersuchung auf dem Rücken. Für den Signalempfang wurde eine dafür geeignete 16-Kanal Knie Spule benutzt. Vor Beginn der Untersuchung bekam jeder Proband einen Notfallknopf in die Hand und Kopfhörer aufgesetzt. Es wurden koronare Aufnahmen in Protonendichte-Wichtung mit spektraler Fettsuppression gemacht. Die Einstellungen bezüglich der MRT-Sequenz waren T_R 4150 ms und T_E 50 ms. Die erbrachte Voxelgröße betrug 0,35 x 0,46 x 2,5 mm und das Field-of-View (FoV) 160 x 160 mm. Parallele Bildgebung (SENSE, Faktor 2) wurde genutzt, um schneller Bilder zu akquirieren. Die gesamte bildgebende Untersuchung dauerte circa 15 Minuten pro Proband.

Die Bilder wurde dann in das Bilderarchivierungs und -kommunikationssystem Picture Archiving and Communication System (PACS) (Agfa, Ridgefield Park, NJ) eingespielt und dort ausgewertet. Das Ergebnis des MRT wurde auf Meniskusrisse, Knorpelschäden und Ligamentverletzungen untersucht. Knorpelschäden wurden dabei nach dem International Cartilage Repair Society (ICRS) Klassifikationssystem (Brittberg & Winalski, 2003) beurteilt. Meniskuspathologien wurden zudem nach Rissmustern und weiteren Zeichen degenerativer Veränderungen, wie Meniskusextrusion, parameniskalen Zysten und Knochenmarksödem, untersucht.

2.7 Statistische Auswertung

Vor Durchführung der Studie wurde eine Poweranalyse mit G*Power 3.1.9.2 (Franz Paul, Kiel, Deutschland) durchgeführt. Die mittlere MME für stehende und liegende Messung mit jeweiliger Standardabweichung wurden aus einer vorherigen Studie abgeschätzt (Achtlich et al., 2018). Mit einer Effektstärke von 0,74, einem α von 0,05 und mindestens 17 Probanden betrug die Power dieser aktuellen Studie 0,8.

Sämtliche Daten wurden in einer Excel-Datei gesammelt. Für die statistische Analyse der Daten wurde die Software SPSS (SPSS, Chicago, IL) benutzt. Für alle Berechnungen wurde ein p-Wert kleiner 0,05 als statistisch signifikant gewertet. Die Bilder aus Ultraschall und

MRT wurden von einem Facharzt für Orthopädie nach den in Kapitel 2.5 und 2.6 beschriebenen Methoden ausgewertet.

Die deskriptive Statistik bestehend aus der Berechnung von Mittelwert, Standardabweichung, Median, Minimum, Maximum und den Perzentilen (25., 50., 75.) wurde für das Alter, den BMI, die MME, die Kategorien des KOOS, die VAS, die Tegner Aktivitätsskala, die Laufkilometer pro Woche und die Jahre seit Beginn des intensiven Laufsports durchgeführt. Die Daten wurden mittels Shapiro-Wilk-Test und Kolmogorov-Smirnoff-Test auf Normalverteilung überprüft.

Zwischen VAS und MME wurde die nicht-parametrische Korrelation durch den Kendall-Test berechnet und mit p-Wert sowie Korrelationskoeffizient dargestellt. Der Korrelationskoeffizient ist signifikant, wenn der Wert kleiner als 0,2 ist. Für den Vergleich des KOOS vor und nach dem Lauf wurde der Wilcoxon-Test verwendet. Für die Vergleiche der MME aus der Voruntersuchung mit den nachfolgenden Messungen, 1. Etappe, 3. Etappe, 7. Etappe und Nachuntersuchung, wurde der t-Test verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Probanden

Es wurden 19 Probanden in die Studie eingeschlossen. Ein Proband wurde aufgrund einer akuten Schulterverletzung ausgeschlossen. Dadurch belief sich die Zahl der Probanden auf 18. Eingeschlossen wurden insgesamt neun linke und neun rechte Knie.

Bei Etappe 1 und Etappe 3 wurden die Messwerte von allen Probanden erhoben. Bei Etappe 7 konnten nicht mehr alle Probanden in die Untersuchung einbezogen werden: 1 Läufer erlitt ein Umknicktrauma, 3 Probanden brachen nach Etappe 5 den Bergmarathon ab. Bei den Messungen nach Etappe 7 wurden demnach nur 14 Teilnehmer untersucht. Die Dropout-Rate belief sich somit von Etappe 3 auf Etappe 7 auf 22,2 Prozent. Bei der Nachuntersuchung wurden alle 18 Läufer miteinbezogen. Die Zahl der Probanden pro Messzeitpunkt ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Messpunkt	Anzahl Probanden
Voruntersuchung	18
Etappe 1	18
Etappe 3	18
Etappe 7	14
Nachuntersuchung	18

Tabelle 3.1: Anzahl der einbezogenen Probanden nach Messpunkt

3.1.1 Untersuchungszeitpunkte

Die Voruntersuchungen fanden zwischen dem 11.08. und dem 01.09.2017 statt. Im Durchschnitt lagen zwischen der Voruntersuchung und der ersten Etappe des TAR $7,9 \pm 5,3$ Tage. Die Nachuntersuchungen fanden zwischen dem 18.09. und dem 05.10.2017 statt. Im Durchschnitt war die Nachuntersuchung $14,4 \pm 4,1$ Tage nach der letzten Etappe.

3.1.2 Demographische Daten

Die demographischen Details der Probanden sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Das Durchschnittsalter betrug $37,4 \pm 8,3$ Jahren (Altersumfang: 27 bis 54 Jahre). Der BMI lag im Durchschnitt bei $21,4 \pm 1,3$ kg/m² (Umfang: 19,5 bis 24,2 kg/m²).

Geschlecht	Anzahl	Merkmal	Mittelwert	SD
weiblich	5	Alter	40,6	8,0
		BMI	20,6	1,0
männlich	13	Alter	36,2	8,4
		BMI	21,7	1,3
Gesamt	18	Alter	37,4	8,3
		BMI	21,4	1,3

Tabelle 3.2: Charakteristika der Probanden

3.1.3 Vorooperationen

Keiner der Probanden hatte Vorooperationen am eingeschlossenen Knie.

3.1.4 Trainingsprofil der Probanden

Die Trainingskilometer pro Woche (80 ± 30 km), die die Teilnehmer der Studie vor dem TAR gelaufen sind, sind in Abbildung 3.1 zu sehen. Die Probanden praktizieren seit unterschiedlich vielen Jahren intensiven Laufsport ($11,2 \pm 8,8$ Jahre). Dies ist in Abbildung 3.2 ersichtlich.

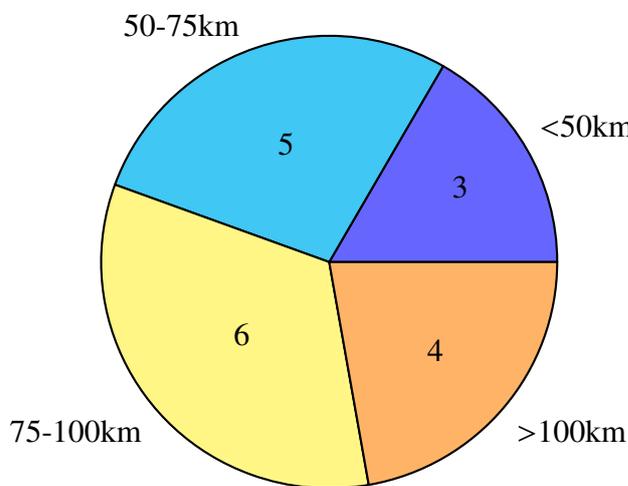


Abbildung 3.1: Wöchentliche Trainingskilometer je Proband vor dem TAR

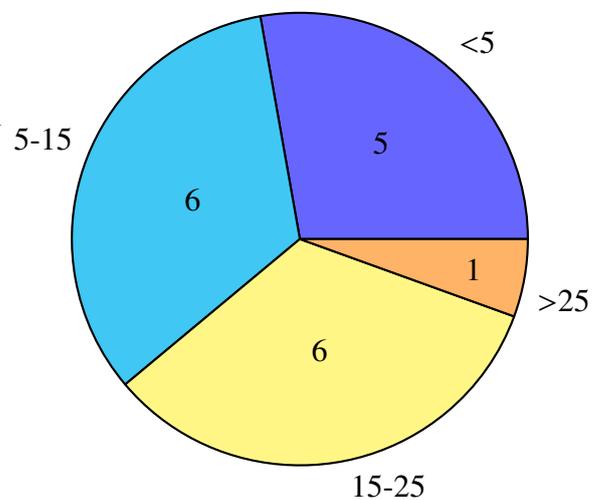


Abbildung 3.2: Dauer des intensiven Laufsports in Jahren

Alle weiteren betriebenen Sportarten der Probanden sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

Sportart	Anzahl Probanden
Rad fahren	10
Klettern	6
Skitouren	5
Schwimmen	3
Krafttraining	2
Langlauf	2
Ski fahren	2
Athletiktraining	1
Bouldern	1
Fußball	1
Obstacle Run	1
Reiten	1
Skateboard	1
Snowboard	1
Wandern	1
Yoga	1
Zumba	1
keine weitere	3

Tabelle 3.3: Weitere Sportarten der Probanden

3.2 Klinische Untersuchung

Bei der klinischen Untersuchung in Anlehnung an die Vorgaben des IKDC gab es bei keinem Probanden Auffälligkeiten. Die Inspektion ergab keinen pathologischen Befund. Über dem medialen Gelenkspalt war kein Druckschmerz feststellbar. Die Beweglichkeit war bei allen Patienten im Normbereich. Die Ligamente zeigten sich stabil. Die Meniskuszeichen waren bei allen Probanden negativ.

3.3 Fragebögen

3.3.1 Tegner Aktivitätsskala

Auf der Tegner Aktivitätsskala ordneten die Probanden sich vor dem Lauf im Durchschnitt mit $7,2 \pm 0,5$ (Umfang: 6 bis 8) ein. Genauer ersichtlich sind die einzelnen Einordnungen in die Aktivitätsgrade in Abbildung 3.3. Aktivitätsgrad 7 entspricht dabei Sportarten wie zum Beispiel Leichtathletik (Lauf- und Wurfdisziplinen), Orientierungslauf, Crosslauf, Geräteturnen, Basketball und Tennis auf Wettkampfniveau sowie Eishockey, Fußball und Ski alpin als Freizeitsport (Tegner & Lysholm, 1985).

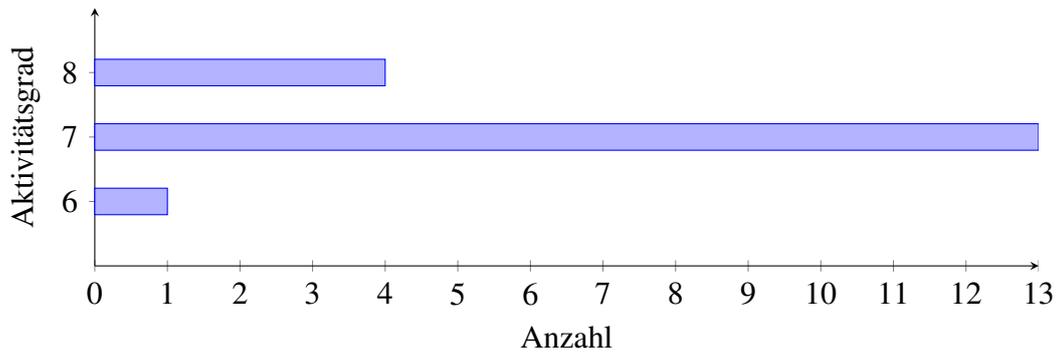


Abbildung 3.3: Tegner Aktivitätsskala

3.3.2 Visuelle Analogskala

Vor dem Lauf klagte keiner der Probanden über Schmerzen ($VAS = 0,0 \pm 0,0$). Während des Laufes war die VAS mal höher und mal niedriger. Nach der ersten Etappe betrug sie $2,1 \pm 2,4$, nach der dritten $0,8 \pm 1,1$ und nach der siebten Etappe $1,3 \pm 1,5$. In der Nachuntersuchung fiel die VAS auf $0,1 \pm 0,2$ zurück. Graphisch dargestellt wird die VAS je Messpunkt in Abbildung 3.4.

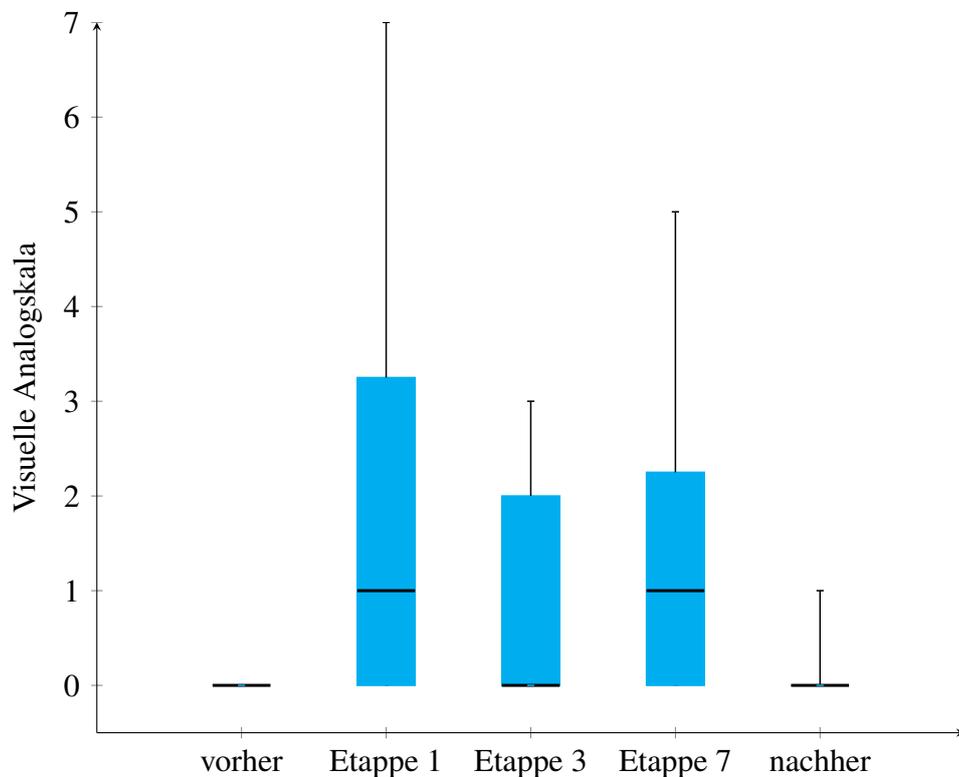


Abbildung 3.4: VAS vor, während und nach dem TAR

3.3.3 Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score

Der KOOS wurde für seine einzelnen Unterkategorien getrennt ausgewertet und war zusätzlich noch in Vor- und Nachuntersuchung unterteilt. Für die Kategorie Funktionsfähigkeit in Sport und Freizeit wurde eine signifikante Verbesserung nach dem Lauf festgestellt ($p=0,026$). Für alle weiteren Kategorien zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Die Werte des KOOS sind mit p-Werten in Tabelle 3.4 dargestellt.

Kategorie	vorher	nachher	p-Wert
Schmerz	98,0 ± 2,8	98,3 ± 3,5	p=0,427
Symptome	98,0 ± 5,2	97,6 ± 3,9	p=0,498
Alltag	99,8 ± 0,6	99,8 ± 0,5	p=0,655
Sport	96,1 ± 5,0	98,9 ± 3,2	p=0,026
Qualität	92,4 ± 13,8	96,9 ± 5,4	p=0,088

Tabelle 3.4: KOOS vor und nach dem TAR

3.4 Magnetresonanztomographie

In der MRT Untersuchung zum Zeitpunkt der Voruntersuchung ergaben sich bei zwei der Probanden degenerative horizontale Risse im medialen Meniskus (11,1%). Eine Meniskuszyste konnte bei einem Probanden festgestellt werden (5,6%).

Bei fünf Probanden (27,8%) konnten leichte degenerative Veränderungen des Knorpels (ICRS Grad 1-2) festgestellt werden. Drei Probanden hatten diese sowohl im medialen, als auch im lateralen Teil des Femoro-Tibialen Gelenks (16,7%). Zwei Probanden hatten diese nur auf der medialen Seite (11,1%).

Alle weiteren Befunde waren unauffällig.

3.5 Ultraschall

Die Messwerte der MME mit dem Ultraschall sind in den Abbildungen 3.5 (für liegend) und 3.6 (für stehend) gezeigt. Während des Wettkampfes stieg die MME von Messung zu Messung an und war fast immer signifikant im Vergleich zur initialen Messung. Eine Zusammenfassung der Messwerte vor und während des TAR und die p-Werte der Signifikanztestung sind in Tabelle 3.5 dargestellt. In Abbildung 3.7 ist die Messung in Original-Ultraschallbildern eines Probanden dargestellt. Gezeigt werden Bilder aus der Voruntersu-

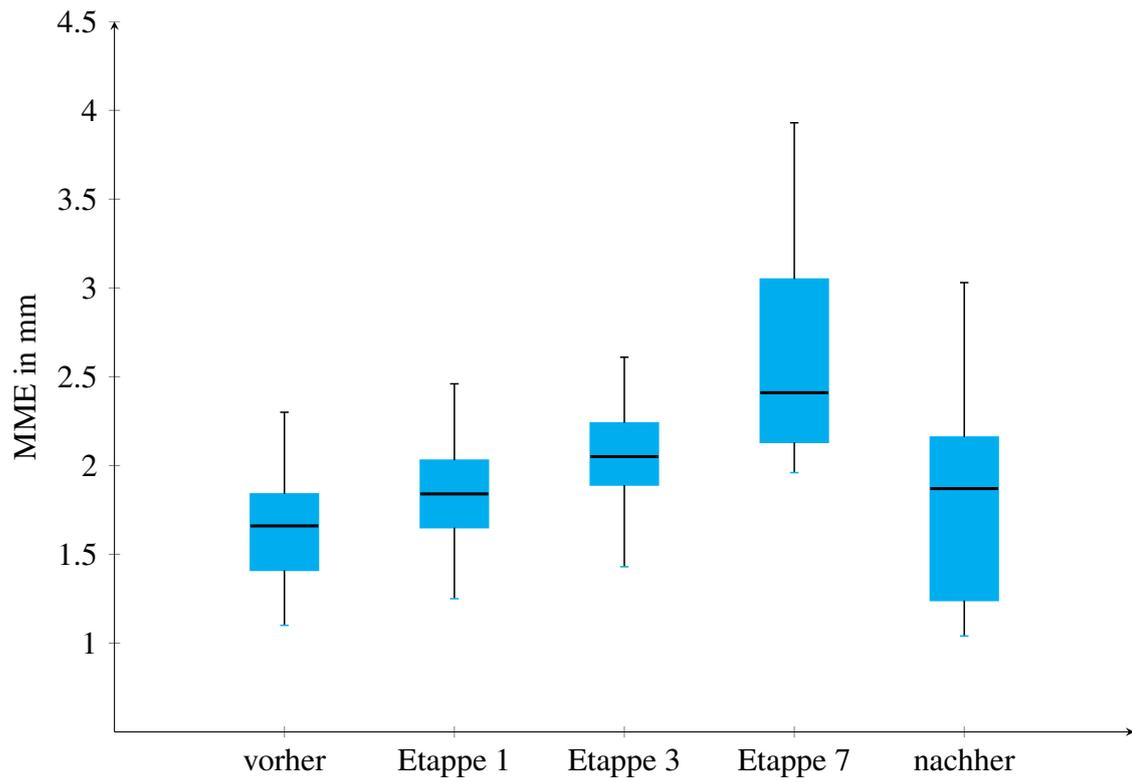


Abbildung 3.5: MME liegend vor, während und nach dem TAR

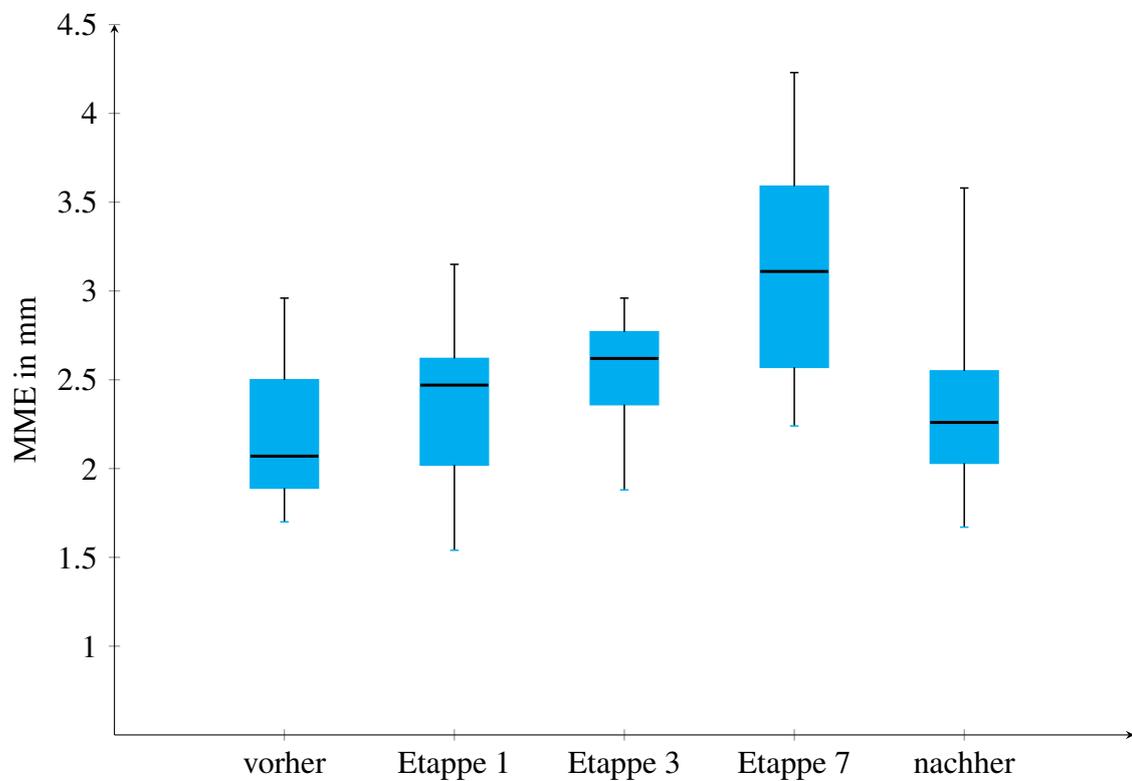


Abbildung 3.6: MME stehend vor, während und nach dem TAR

chung, der Untersuchung nach Etappe 7 und der Nachuntersuchung die im Liegen aufgenommen wurden.

Messpunkt	Position	Mittelwert	SD	Signifikanz
vorher	liegend	1,6	0,3	
	stehend	2,2	0,4	
Etappe 1	liegend	1,9	0,3	p=0,020
	stehend	2,4	0,4	p=0,088
Etappe 3	liegend	2,1	0,3	p<0,001
	stehend	2,5	0,3	p=0,005
Etappe 7	liegend	2,7	0,7	p<0,001
	stehend	3,1	0,6	p<0,001

Tabelle 3.5: MME in mm vor und während dem TAR mit Signifikanzwerten

Die Messung zwei Wochen nach dem Lauf, in welchen die Probanden nur regenerative Sporteinheiten ausübten, ergab eine mittlere MME von $1,8 \pm 0,5$ mm im Liegen und $2,3 \pm 0,5$ mm im Stehen. Diese Werte weichen nicht signifikant von denen der Voruntersuchung ab ($p=0,17$ und $p=0,33$). Für die letzte Untersuchung gab es eine Ausnahme, die auf den Abbildungen 3.5 und 3.6 als großer maximaler Ausschlag der Nachuntersuchung zu sehen ist. Ein Proband hatte zwei Wochen nach dem Lauf noch ein MME von 3,2 mm im Liegen und 3,6 mm im Stehen.

Zu keinem Zeitpunkt konnte eine signifikante Korrelation zwischen VAS und MME festgestellt werden. Die p-Werte und der jeweilige Korrelationskoeffizient (KK) nach Kendall sind in Tabelle 3.6 zu sehen.

Messpunkt	Position	MME	VAS	KK	p-Wert
vorher	liegend	$1,6 \pm 0,3$	$0,0 \pm 0,0$		
	stehend	$2,2 \pm 0,4$			
Etappe 1	liegend	$1,9 \pm 0,3$	$2,1 \pm 2,4$	-0,068	p=0,718
	stehend	$2,4 \pm 0,4$		0,045	p=0,810
Etappe 3	liegend	$2,1 \pm 0,3$	$0,8 \pm 1,1$	-0,008	p=0,965
	stehend	$2,5 \pm 0,3$		-0,159	p=0,408
Etappe 7	liegend	$2,7 \pm 0,7$	$1,3 \pm 1,5$	-0,162	p=0,453
	stehend	$3,1 \pm 0,6$		-0,087	p=0,686
nachher	liegend	$1,8 \pm 0,5$	$0,1 \pm 0,2$	-0,139	p=0,499
	stehend	$2,3 \pm 0,5$		-0,257	p=0,210

Tabelle 3.6: p-Werte und KK von VAS zu MME in mm

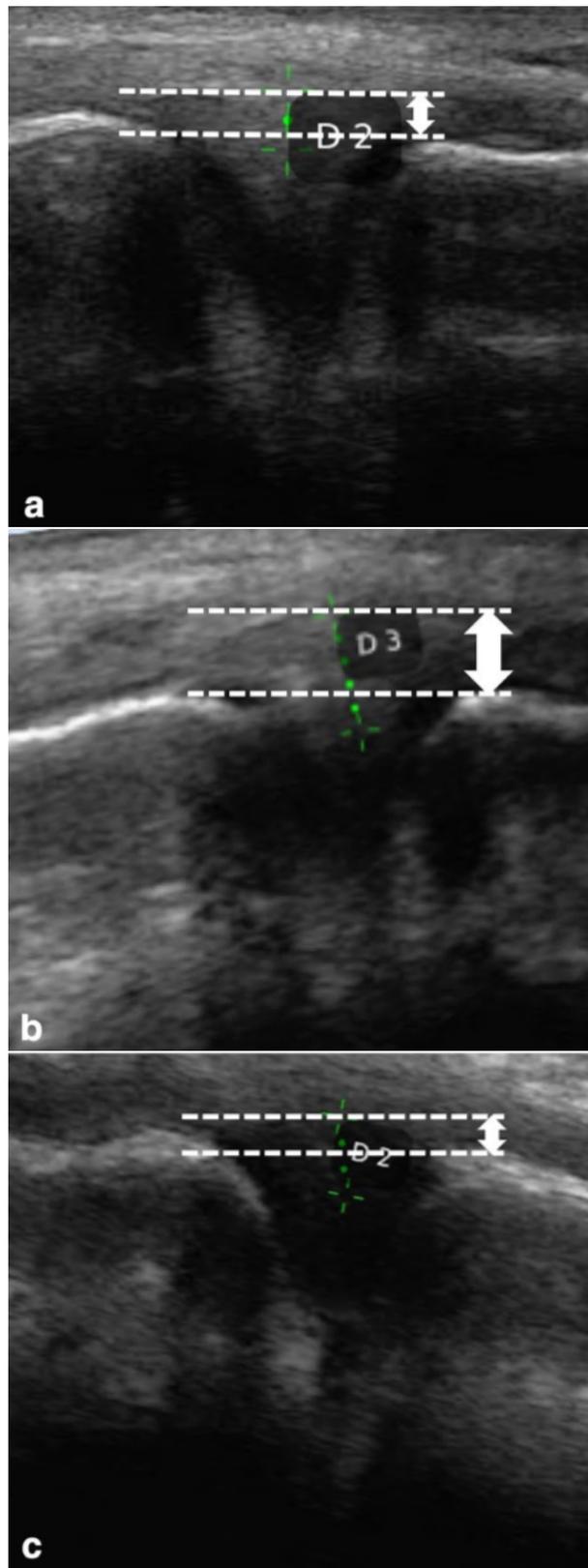


Abbildung 3.7: MME im Ultraschallbild: a) vorher, b) nach Etappe 7, c) nachher

4 Diskussion

Die wichtigste Erkenntnis dieser Studie ist, dass es eine Anpassungsreaktion des Meniskus auf eine Extremlast im Rahmen eines Bergultramarathons (TAR) bei gesunden Athleten gibt. Konkret wurde die Frage nach der MME unter Extremlast mittels Sonographie des Meniskus beurteilt.

Untersucht wurde dafür die MME vor, während und nach dem TAR. Dieser Wettbewerb ist ein siebentägiger Etappenlauf über die Alpen mit insgesamt 270,5 km, 16.453 Hm und 15.427 Hm im Aufstieg. Eingeschlossen wurden gesunde Athleten ohne Voroperationen oder aktuelle Verletzungen am Knie. Die MME wurde dabei im Stehen und im Liegen mittels Ultraschallgerät bestimmt. Dabei zeigte sich eine steigende MME im Verlauf des Rennens. Nach Etappe 7 betrug die durchschnittliche MME im Liegen $2,7 \pm 0,7$ mm und im Stehen $3,1 \pm 0,6$ mm, was ein signifikanter Anstieg zur Voruntersuchung ist ($p < 0,001$, $p < 0,001$). Nach einer zweiwöchigen Erholungsphase zeigten sich die Werte bei der Nachuntersuchung im Vergleich zur Voruntersuchung nicht signifikant verändert ($p = 0,499$, $p = 0,210$). Beide zuvor gestellten Hypothesen konnten somit belegt werden. Es konnte kein Zusammenhang zwischen der MME und den KOOS-Werten bzw. den Schmerzen im Knie, welche mittels der VAS erfasst wurden, festgestellt werden.

4.1 Meniskusextrusion physiologisch

Die reversible Meniskusextrusion unter Extremlast zeigt, dass Meniskusextrusion nicht nur als pathologisches Zeichen gewertet werden sollte, da diese auch in gesunden Probanden und Sportlern gefunden werden kann. Weitere Beispiele für eine physiologische Meniskusextrusion sind unter anderem die Korrelation der Meniskusextrusion mit dem Alter und dem BMI (Achnich et al., 2018), sowie die Erhöhung der Meniskusextrusion im Stehen im Vergleich zum Liegen (Patel et al., 2016). Somit sind die Ergebnisse dieser Studie im Einklang mit denen ähnlicher Studien.

4.2 Asymptomatische Meniskusverletzungen

Walczak et al. (2008) beschrieben, dass bei gesunden Sportlern häufig asymptomatische Meniskusverletzungen gefunden werden. Beals et al. (2016) fanden in 31,1% der von Ihnen untersuchten asymptomatischen Sportler eine Pathologie des Meniskus. Bei 3,9% der Probanden zeigte sich ein Riss des Meniskus. Meniskusrisse und davon insbesondere Hinterhornrisse weisen eine positive Korrelation mit Meniskusextrusion auf (Costa et al., 2004).

Aus diesem Grund wurde bei der Voruntersuchung eine MRT-Untersuchung durchgeführt. Dabei wurde insbesondere auf Meniskus- und Knorpelschädigungen geachtet. In 16,7% der Athleten wurden Meniskusverletzungen gefunden. Bei einem Probanden zeigte sich ein horizontaler degenerativer Riss am Hinterhorn des medialen Meniskus. In der Voruntersuchung konnte keine pathologische MME eruiert werden. Dieser Proband hatte nach zwei Wochen keine vollständige Reversibilität der Meniskusextrusion. Bei der Nachuntersuchung betrug die MME im Liegen 3,2 mm und im Stehen 3,6 mm. Bei den anderen Probanden mit Meniskuspathologien und bei den meniskusgesunden Probanden zeigte sich eine vollständige Reversibilität. Dabei betrug die MME im Liegen $1,8 \pm 0,5$ und im Stehen $2,3 \pm 0,5$ zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung.

4.3 Grenzwert zu pathologischer Meniskusextrusion

In der Literatur korreliert Meniskusextrusion im MRT mit Pathologien des Meniskus und mit einer fortgeschrittenen Arthrose (Costa et al., 2004; Crema et al., 2012). Eine starke Korrelation zwischen MME im MRT und Meniskushinterhornläsionen ist bestätigt (Choi et al., 2010). Costa et al. (2004) zeigten in einer Studie, dass 39,4% der Probanden mit pathologischer Meniskusextrusion (> 3 mm) eine Wurzelläsion des Meniskus aufwiesen. Aber auch bei 13,4% der Probanden mit einer kleineren Meniskusextrusion (< 3 mm) konnten Zeichen einer solchen Ruptur nachgewiesen werden. Zusätzlich gibt es auch Probanden mit einer Meniskusextrusion von mehr als 3 mm im MRT, bei welchen jedoch kein Riss des Meniskus weder im MRT noch in der Arthroskopie nachgewiesen werden konnte (Magee, 2008). Außerdem beeinflusst die Geometrie des Meniskusquerschnittes direkt die resultierende Kraft, welche verantwortlich für die Meniskusextrusion ist (Luczkiewicz et al., 2015). Die vorliegende Studie zeigt, dass eine extreme axiale Belastung, welche durch den Ultramarathon auf den Meniskus wirkt, in einer Meniskusextrusion größer als 3 mm resultieren kann. Dieser Wert ist in der Literatur als pathologisch definiert (Choi et al., 2010; Costa et al., 2004). Werte von über 3 mm zeigten sich bei allen außer dem zuvor beschriebenen Probanden nach zwei Wochen als vollständig reversibel. Jedoch liegt der Wert nicht über den 4 mm, die aktuell von Svensson et al. (2019) vorgeschlagen werden. Die Ergebnisse unserer Studie sprechen auch für einen neuen Grenzwert von 4 mm, der die Spezifität der Messung der Meniskusextrusion erhöhen würde. Auf der anderen Seite würde die Sensitivität verringert werden. Um sowohl eine bessere Spezifität als auch eine bessere Sensitivität zu erreichen wäre ein anderer Parameter möglicherweise besser geeignet. Ein Beispiel für einen anderen Parameter wäre die Differenz zwischen der belasteten und unbelasteten Messung (Karpinski et al., 2019). Diese kann man auch als dynamische Messung bezeichnen. Dazu gibt es aktuell jedoch noch wenig Daten. Diese Daten zum Grenzwert sind alle für den medialen Meniskus. Der laterale Meniskus ist dahingehend nicht so gut untersucht. Für diesen gibt es bisher keine

Grenzwerte.

4.4 Dynamische Beurteilung der Meniskusextrusion

Im MRT kann die Meniskusextrusion nur unter statischen Bedingungen gemessen werden. Im Ultraschall hingegen ist auch eine dynamische Beurteilung möglich. In biomechanischen Studien konnte gezeigt werden, dass es eine physiologische Meniskusextrusion gibt (Achtlich et al., 2018; Patel et al., 2016). Um die physiologische Meniskusextrusion zu bestimmen ist eine dynamische Untersuchung mittels Ultraschall zu bevorzugen, da die Funktion des Meniskus dabei Beachtung findet. Von diesen Ergebnissen ausgehend kann nicht nur eine absolut erhöhte Meniskusextrusion, gemessen im MRT, Hinweis auf eine fehlende Funktion und somit auf eine Pathologie des Meniskus sein, sondern auch eine größere oder fehlende funktionelle Meniskusextrusion unter axialer Belastung. Im Einklang mit der Idee einer funktionellen Meniskusextrusion haben Patel et al. (2016) diese in unbelasteten und belasteten MRT-Untersuchungen evaluiert. Dabei ergaben sich eine MME von $1,0 \pm 0,7$ mm ohne Belastung und $1,6 \pm 0,9$ mm mit Belastung. Dieser Unterschied zwischen der belasteten und unbelasteten Messung ist signifikant. Unsere Studie hat ebenfalls eine funktionelle MME in gesunden Athleten gezeigt. Diese bestand vor, während und nach dem Ultramarathon.

4.5 Histologie und Meniskusextrusion

Die Meniskusextrusion beruht vermutlich auch auf dem Aufbau und der Zusammensetzung des Meniskus. Die Bestandteile des Meniskus erklären auch sein viskoelastisches Potential. Ein mechanisch wichtiger Bestandteil des Meniskus sind die Proteoglykane (Herwig et al., 1984). Man kann diese in zwei Gruppen einteilen. Die großen Proteoglykane sind für den Wassergehalt und die Elastizität verantwortlich. Ein Beispiel dafür ist Aggrecan. Die kleinen Proteoglykane, wie beispielsweise Decorin, interagieren mit Kollagen und stabilisieren den Kollagenrahmen (Bhosale & Richardson, 2008; Fox et al., 2009; McNicol & Roughley, 1980). Außerdem besteht der Meniskus aus Wasser (Herwig et al., 1984), welches von den Proteoglykanen gebunden wird. Aus MRT-Studien weiß man, dass die Werte für T1rho und T2 nach einem Marathon im gesamten Meniskus erhöht sind. Bei der Kontrolluntersuchung nach drei Monaten wurde festgestellt, dass die Werte für T2 normwertig und die Werte für T1rho weiterhin erhöht sind (Stehling et al., 2011). Die Relaxationszeit in der T2-Wichtung korreliert stark mit dem Wassergehalt des Gewebes (Son et al., 2013). T1rho dagegen ist mit dem Gehalt an Proteoglykanen assoziiert (Akella et al., 2001). Deshalb ist nach einer großen Belastung auf den Meniskus, wie zum Beispiel durch einen Ultramarathon, der Wassergehalt im Gewebe erhöht und gleichzeitig die Proteoglykansubstanz vermindert. Nach drei Mona-

ten ist die Proteoglykansubstanz weiterhin vermindert. Möglicherweise ist das ein Hinweis auf eine frühe degenerative Veränderung. Der Wassergehalt hat sich nach dieser Zeit hingegen erholt (Stehling et al., 2011). Der genaue Mechanismus hierfür ist noch ungeklärt. Jedoch könnten die Veränderungen von Wasser- und Proteoglykangehalt in der Matrix des Meniskus die Kollagenfasern beeinträchtigen und dadurch zu einer erhöhten MME während und nach einem Ultramarathon führen. Die Regeneration des Wassergehaltes könnte im Zusammenhang mit der Reversibilität der Meniskusextrusion stehen.

4.6 Laufen und Arthrose

Das Laufen über eine lange Distanz führt in unserer Studie zu einer temporären Meniskusextrusion. In anderen Studien ist eine Meniskusextrusion mit Arthrose verbunden (Crema et al., 2012). Das führt zu der Frage zurück, ob Laufen die Strukturen des Knies schädigt und zu einer Arthrose führen kann. Da die Meniskusextrusion reversibel ist, gibt es keinen Anhalt für eine permanente Schädigung des Meniskus. Jedoch ist eine Meniskusextrusion eine Funktionseinschränkung des Meniskus. Diese führt schnell zu einer Arthrose (Allaire et al., 2008). Ein Grund dafür ist, dass der Meniskus den darunter liegenden Knorpel schützt (Liu et al., 2017; Karanfil et al., 2018). Eine weitere Ursache ist, dass ein extrudierter Meniskus die Kraft auf das Tibiaplateau weniger gut verteilen kann. Daraus resultiert ein größerer Druck auf einer kleineren Fläche (Luczkiewicz et al., 2015). Dadurch kann der Knorpel geschädigt werden. Geschädigter Knorpel ist ein Teil der Pathogenese der Arthrose (Lüring et al., 2011). Somit könnte die Meniskusextrusion, welche durch den Ultramarathon bedingt ist, eine Arthrose begünstigen. Andererseits stellt sich die Frage, wie viel Schaden innerhalb von einer Woche entstehen kann, da die Genese einer Arthrose ein langsamer Prozess ist (Glyn-Jones et al., 2015). Falls es zu Schäden am Knorpel kommt, sobald sich der Meniskus extrudiert, stellt sich auch die Frage ab wann und ob es dabei einen Bezug auf den Grenzwert für pathologische Meniskusextrusion gibt. Hohe Laufbelastungen führt zu mehr Arthrose als kein Laufen oder Laufen mit niedrigerer Beanspruchung (Alentorn-Geli et al., 2017; Driban et al., 2017). Möglicherweise ist das eine Erklärung, warum eine hohe Laufbelastung zu mehr Arthrose führen kann. Eine genaue Definition von hoher Belastung gibt es jedoch bisher nicht.

4.7 Limitationen

Eine Limitation dieser Studie ist, dass die MRT-Untersuchung nur vor dem Lauf durchgeführt worden ist und nicht nochmal während oder nach dem Ultramarathon. Die Ergebnisse von Ultraschalluntersuchungen sind abhängig vom Untersucher. Allerdings wurde eine gute bis exzellente Intra- und Interrater-Reliabilität für die sonographische Messung der Menis-

kusextrusion in einer vorherigen Studie gezeigt (Achnich et al., 2018). Bei der Messung der Meniskusextrusion wurde nur die radiale Extrusion in der koronaren Schicht bestimmt und nicht die Meniskusextrusion in anterior-posteriorer Richtung. Weiterhin wurde die Beinachse der Patienten nicht eruiert. Dies könnte Einfluss auf die Meniskusextrusion haben. Da bei einem Genu valgum der Innenmeniskus weniger belastet wird, könnte sich eine geringere Differenz zwischen Voruntersuchung und Messung an Tag 7 ergeben. Inwieweit ein funktionelles Genu valgum Einfluss nimmt, ist fraglich. Des Weiteren wurde der muskuläre Status der Probanden nicht miteinbezogen. Muskeln reduzieren die Kraft, die auf die Gelenke wirkt (Cole et al., 1996). Somit könnten diese die Belastung, die auf den medialen Meniskus wirkt, verringern. Der Einfluss des Alters wurde in dieser Studie nicht beachtet, da dafür zu wenig Probanden an der Studie teilnahmen. Die Meniskusextrusion nimmt mit dem Alter zu (Achnich et al., 2018). Daher wäre es interessant die Veränderungen während der Extrembelastung in Bezug auf das Alter zu stellen. Auch wenn die Meniskusextrusion immer sofort nach Ankunft im Ziel bestimmt worden ist, gibt es ein Risiko für eine frühzeitige Erholung und somit falsch-niedrige Werte. Eine weitere Limitation ist die recht kleine Probandenzahl von 18 Probanden und insbesondere von nur 14, welche die gesamte Strecke gelaufen sind.

4.8 Klinischer Bezug

In der klinischen Praxis sollte die im Stehen durch das Körpergewicht belastete Messung der Meniskusextrusion berücksichtigt werden. Unsere Ergebnisse erweitern die physiologischen Grenze der Meniskusextrusion. Deshalb sollte der aktuelle Grenzwert hin zu pathologischer Meniskusextrusion neu evaluiert werden. Eine verstärkte oder fehlende funktionelle Meniskusextrusion (Differenz zwischen unbelasteter und belasteter Messung) könnte die Funktion des Meniskus besser beurteilen als eine statische Messung im MRT. Das könnte in Zukunft bei der Indikationsstellung zu Meniskusoperationen hilfreich sein. Ein weiterer Aspekt ist die Arthroseprävention. Dabei ist aber noch fraglich, ob und ab wann eine belastungsinduzierte Meniskusextrusion zu einer Arthrose führt.

4.9 Ausblick

Bisher haben wir gezeigt, dass ein gesunder Meniskus nach einer extremen axialen Belastung eine vollständige Erholung der Extrusion nach 14 Tagen aufweist. Es bleibt ungeklärt, wie lange dieser Prozess genau dauert. Um dies zu untersuchen, könnte die Meniskusextrusion nach einem Ultramarathon engmaschiger nachverfolgt werden. Interessant wäre es außerdem mehr Probanden mit asymptomatischen Meniskusverletzungen, insbesondere mit Meniskuswurzelläsion, unter Extrembelastungen zu untersuchen. Auch wäre die Entwicklung der Me-

niskusextrusion und das Verhalten der Reversibilität bei einem vorgeschädigten Meniskus interessant zu beobachten. Der Einfluss der Beinachse auf die Meniskusextrusion, insbesondere unter Belastung stellt eine weitere Studienmöglichkeit dar. In der Zukunft könnte die Sonographie des Meniskus eine größere Rolle spielen, da es die einzige Möglichkeit ist, die Funktion zu evaluieren. Dies kann auch einen hohen Stellenwert in der Beurteilung von Funktionalität und von Meniskustransplantaten haben. Dafür bräuchte es jedoch noch mehr Daten, wie sich die Meniskusextrusion und insbesondere die dynamische Meniskusextrusion bei verschiedenen Pathologien und auch bei verschiedenen physiologischen Einflüssen verhält. Nachdem bisher vor allem die mediale Meniskusextrusion untersucht wurde, stellt sich auch die Frage ob das für den lateralen Meniskus genauso zutrifft.

5 Schlussfolgerungen

Die mediale Meniskusextrusion, welche durch die extremen axialen Belastungen in einem Bergultramarathon erzeugt wird, ist ein temporäres und reversibles Phänomen in gesunden Athleten. Der Meniskus besitzt viskoelastische Eigenschaften, wodurch er sich kurzfristig an hohe Belastungen anpassen kann. Diese sind mit der Zeit vollständig reversibel. Wegen der Möglichkeit einer dynamischen Untersuchung der Meniskusextrusion und des geringeren apparativen Aufwandes sollte eine Ultraschallmessung einer MRT-Untersuchung vorgezogen werden. Außerdem sollte eine sportliche Belastung des Knies vor der Untersuchung berücksichtigt werden, wenn die mediale Meniskusextrusion beurteilt wird. Der aktuelle Vorschlag, den Grenzwert für die Meniskusextrusion auf 4 mm zu erhöhen, sollte weiter untersucht werden. Zudem gibt es einen Zusammenhang zwischen Meniskusextrusion und Arthrose, was den Grund darstellen kann, dass hohe Laufbelastungen zu Arthrose führen können.

Literaturverzeichnis

- Aagaard, H. & Verdonk, R. (1999). Function of the normal meniscus and consequences of meniscal resection. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 9 (3), 134–140.
- Achtnich, A., Petersen, W., Willinger, L., Sauter, A., Rasper, M., Wörtler, K., Imhoff, A. B. & Diermeier, T. (2018). Medial meniscus extrusion increases with age and bmi and is depending on different loading conditions. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 26 (8), 2282–2288.
- Akella, S. V., Regatte, R. R., Gougoutas, A. J., Borthakur, A., Shapiro, E. M., Kneeland, J. B., Leigh, J. S. & Reddy, R. (2001). Proteoglycan-induced changes in T₁ρ-relaxation of articular cartilage at 4t. *Magnetic resonance in medicine*, 46 (3), 419–423.
- Alentorn-Geli, E., Samuelsson, K., Musahl, V., Green, C. L., Bhandari, M. & Karlsson, J. (2017). The association of recreational and competitive running with hip and knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 47 (6), 373–390.
- Allaire, R., Muriuki, M., Gilbertson, L. & Harner, C. D. (2008). Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus. similar to total meniscectomy. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 90 (9), 1922–1931.
- Arnoczky, S. P. & Warren, R. F. (1982). Microvasculature of the human meniscus. *The American journal of sports medicine*, 10 (2), 90–95.
- Arnoczky, S. P. & Warren, R. F. (1983). The microvasculature of the meniscus and its response to injury. an experimental study in the dog. *The American journal of sports medicine*, 11 (3), 131–141.
- Bargar, W. L., Moreland, J. R., Markolf, K. L., Shoemaker, S. C., Amstutz, H. C. & Grant, T. T. (1980). In vivo stability testing of post-meniscectomy knees. *Clinical orthopaedics and related research* (150), 247–252.
- Beals, C. T., Magnussen, R. A., Graham, W. C. & Flanigan, D. C. (2016). The prevalence of meniscal pathology in asymptomatic athletes. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 46 (10), 1517–1524.
- Benjamin, M., Evans, E. J., Rao, R. D., Findlay, J. A. & Pemberton, D. J. (1991). Quantitative differences in the histology of the attachment zones of the meniscal horns in the knee joint of man. *Journal of anatomy*, 177, 127–134.
- Bergmann, G., Graichen, F. & Rohlmann, A. (1993). Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. *Journal of biomechanics*, 26 (8), 969–990.

- Berlet, G. C. & Fowler, P. J. (1998). The anterior horn of the medial meniscus. an anatomic study of its insertion. *The American journal of sports medicine*, 26 (4), 540–543.
- Bhosale, A. M. & Richardson, J. B. (2008). Articular cartilage: Structure, injuries and review of management. *British medical bulletin*, 87, 77–95.
- Bird, M. D. & Sweet, M. B. (1987). A system of canals in semilunar menisci. *Annals of the rheumatic diseases*, 46 (9), 670–673.
- Brittberg, M. & Winalski, C. S. (2003). Evaluation of cartilage injuries and repair. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 85-A Suppl 2, 58–69.
- Cheung, H. S. (1987). Distribution of type i, ii, iii and v in the pepsin solubilized collagens in bovine menisci. *Connective tissue research*, 16 (4), 343–356.
- Chiba, D., Maeda, S., Sasaki, E., Ota, S., Nakaji, S., Tsuda, E. & Ishibashi, Y. (2017). Meniscal extrusion seen on ultrasonography affects the development of radiographic knee osteoarthritis: A 3-year prospective cohort study. *Clinical rheumatology*, 36 (11), 2557–2564.
- Choi, C.-J., Choi, Y.-J., Lee, J.-J. & Choi, C.-H. (2010). Magnetic resonance imaging evidence of meniscal extrusion in medial meniscus posterior root tear. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 26 (12), 1602–1606.
- Cole, G. K., Nigg, B. M., van den Bogert, A. J. & Gerritsen, K. G. (1996). Lower extremity joint loading during impact in running. *Clinical Biomechanics*, 11 (4), 181–193.
- Costa, C. R., Morrison, W. B. & Carrino, J. A. (2004). Medial meniscus extrusion on knee mri: Is extent associated with severity of degeneration or type of tear? *AJR. American journal of roentgenology*, 183 (1), 17–23.
- Crema, M. D., Roemer, F. W., Felson, D. T., Englund, M., Wang, K., Jarraya, M., Nevitt, M. C., Marra, M. D., Torner, J. C., Lewis, C. E. & 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.
- Day, B., Mackenzie, W. G., Shim, S. S. & Leung, G. (1985). The vascular and nerve supply of the human meniscus. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 1 (1), 58–62.
- DePhillipo, N. N., Moatshe, G., Chahla, J., Aman, Z. S., Storaci, H. W., Morris, E. R., Robbins, C. M., Engebretsen, L. & LaPrade, R. F. (2019). Quantitative and qualitative assessment of the posterior medial meniscus anatomy: Defining meniscal ramp lesions. *The American journal of sports medicine*, 47 (2), 372–378.
- Driban, J. B., Hootman, J. M., Sitler, M. R., Harris, K. P. & Cattano, N. M. (2017). Is participation in certain sports associated with knee osteoarthritis? a systematic review.

- Journal of athletic training*, 52 (6), 497–506.
- Dürselen, L. & Freutel, M. (2015). Biomechanik des meniskus. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 10 (03), 215–227.
- Fairbank, T. J. (1948). Knee joint changes after meniscectomy. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* (30B), 664–670.
- Fox, A. J. S., Bedi, A. & Rodeo, S. A. (2009). The basic science of articular cartilage: Structure, composition, and function. *Sports health*, 1 (6), 461–468.
- Fox, A. J. S., 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. *Clinical anatomy (New York, N.Y.)*, 28 (2), 269–287.
- Fukubayashi, T. & Kurosawa, H. (1980). The contact area and pressure distribution pattern of the knee. a study of normal and osteoarthrotic knee joints. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 51 (6), 871–879.
- Gao, J., Oqvist, G. & Messner, K. (1994). The attachments of the rabbit medial meniscus. a morphological investigation using image analysis and immunohistochemistry. *Journal of anatomy*, 185 (Pt 3), 663–667.
- Glyn-Jones, S., Palmer, A. J. R., Agricola, R., Price, A. J., Vincent, T. L., Weinans, H. & Carr, A. J. (2015). Osteoarthritis. *The Lancet*, 386 (9991), 376–387.
- Goldring, M. B. & Goldring, S. R. (2007). Osteoarthritis. *Journal of cellular physiology*, 213 (3), 626–634.
- Hefti, F., Müller, W., Jakob, R. P. & Stäubli, H. U. (1993). Evaluation of knee ligament injuries with the ikdc form. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 1 (3-4), 226–234.
- Herwig, J., Egner, E. & Buddecke, E. (1984). Chemical changes of human knee joint menisci in various stages of degeneration. *Annals of the rheumatic diseases*, 43 (4), 635–640.
- Hespanhol Junior, L. C., Pillay, J. D., van Mechelen, W. & Verhagen, E. (2015). Meta-analyses of the effects of habitual running on indices of health in physically inactive adults. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 45 (10), 1455–1468.
- Hinterwimmer, S., Feucht, M. J., Steinbrech, C., Graichen, H. & von Eisenhart-Rothe, R. (2014). The effect of a six-month training program followed by a marathon run on knee joint cartilage volume and thickness in marathon beginners. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 22 (6), 1353–1359.
- Hoessly, M. L. & Wildi, L. M. (2017). Magnetic resonance imaging findings in the knee before and after long-distance running-documentation of irreversible structural damage? a systematic review. *The American journal of sports medicine*, 45 (5), 1206–1217.
- Jones, R. S., Keene, G. C. R., Learmonth, D. J. A., Bickerstaff, D., Nawana, N. S., Costi, J. J. & Percy, M. J. (1996). Direct measurement of hoop strains in the intact and torn human medial meniscus. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 11 (5), 295–300.

- Karachalios, T., Hantes, M., Zibis, A. H., Zachos, V., Karantanas, A. H. & Malizos, K. N. (2005). Diagnostic accuracy of a new clinical test (the thessaly test) for early detection of meniscal tears. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 87 (5), 955–962.
- Karanfil, Y., Babayeva, N., Dönmez, G., Diren, H. B., Eryılmaz, M., Doral, M. N. & Korkusuz, F. (2018). Thirty minutes of running exercise decreases t2 signal intensity but not thickness of the knee joint cartilage: A 3.0-t magnetic resonance imaging study. *Cartilage*, 1947603518770246.
- 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 surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 27 (10), 3311–3317.
- Kawaguchi, K., Enokida, M., Otsuki, R. & Teshima, R. (2012). Ultrasonographic evaluation of medial radial displacement of the medial meniscus in knee osteoarthritis. *Arthritis and rheumatism*, 64 (1), 173–180.
- Kellgren, J. (1957). Radiological assessment of osteo-arthritis. *Annals of the rheumatic diseases*, 16 (4), 494–502.
- Kessler, M. A., Glaser, C., Tittel, S., Reiser, M. & Imhoff, A. B. (2006). Volume changes in the menisci and articular cartilage of runners: An in vivo investigation based on 3-d magnetic resonance imaging. *The American journal of sports medicine*, 34 (5), 832–836.
- Kessler, M. A., Glaser, C., Tittel, S., Reiser, M. & Imhoff, A. B. (2008). Recovery of the menisci and articular cartilage of runners after cessation of exercise: Additional aspects of in vivo investigation based on 3-dimensional magnetic resonance imaging. *The American journal of sports medicine*, 36 (5), 966–970.
- Kettelkamp, D. B. & Jacobs, A. W. (1972). Tibiofemoral contact area–determination and implications. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 54 (2), 349–356.
- Koo, T. K. & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of chiropractic medicine*, 15 (2), 155–163.
- Krause, W. R., Pope, M. H., Johnson, R. J. & Wilder, D. G. (1976). Mechanical changes in the knee after meniscectomy. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 58 (5), 599–604.
- Lee, D.-C., Pate, R. R., Lavie, C. J., Sui, X., Church, T. S. & Blair, S. N. (2014). Leisure-time running reduces all-cause and cardiovascular mortality risk. *Journal of the American College of Cardiology*, 64 (5), 472–481.
- Liebers, F., Brendler, C. & Latza, U. (2013). Alters- und berufsgruppenabhängige unterschiede in der arbeitsunfähigkeit durch häufige muskel-skelett-erkrankungen. rücken-

- schmerzen und gonarthrose. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 56 (3), 367–380.
- Litwic, A., Edwards, M. H., Dennison, E. M. & Cooper, C. (2013). Epidemiology and burden of osteoarthritis. *British medical bulletin*, 105, 185–199.
- Liu, B., Lad, N. K., Collins, A. T., Ganapathy, P. K., Utturkar, G. M., McNulty, A. L., Spritzer, C. E., Moorman, C. T., Sutter, E. G., Garrett, W. E. & DeFrate, L. E. (2017). In vivo tibial cartilage strains in regions of cartilage-to-cartilage contact and cartilage-to-meniscus contact in response to walking. *The American journal of sports medicine*, 45 (12), 2817–2823.
- Luczkiewicz, P., Daszkiewicz, K., Witkowski, W., Chroscielewski, J. & Zarzycki, W. (2015). Influence of meniscus shape in the cross sectional plane on the knee contact mechanics. *Journal of biomechanics*, 48 (8), 1356–1363.
- Lüring, C., Tingart, M. & Grifka, J. (2011). Degenerative gelenkerkrankungen. In J. Grifka & M. Kuster (Hrsg.), *Orthopädie und unfallchirurgie: Für praxis, klinik und facharztprüfung* (S. 281–297). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Macconail, M. A. (1932). The function of intra-articular fibrocartilages, with special reference to the knee and inferior radio-ulnar joints. *Journal of anatomy*, 66 (Pt 2), 210–227.
- Macconail, M. A. (1950). The movements of bones and joints; the synovial fluid and its assistants. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 32-B (2), 244–252.
- Magee, T. (2008). Mr findings of meniscal extrusion correlated with arthroscopy. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*, 28 (2), 466–470.
- McMurray, T. P. (1942). The semilunar cartilages. *British Journal of Surgery*, 29 (116), 407–414.
- McNicol, D. & Roughley, P. J. (1980). Extraction and characterization of proteoglycan from human meniscus. *The Biochemical journal*, 185 (3), 705–713.
- Messner, K. & Gao, J. (1998). The menisci of the knee joint. anatomical and functional characteristics, and a rationale for clinical treatment. *Journal of anatomy*, 193 (Pt 2), 161–178.
- 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. *The American journal of sports medicine*, 38 (8), 1591–1597.
- Nakata, K., Shino, K., Hamada, M., Mae, T., Miyama, T., Shinjo, H., Horibe, S., Tada, K., Ochi, T. & Yoshikawa, H. (2001). Human meniscus cell: Characterization of the primary culture and use for tissue engineering. *Clinical orthopaedics and related research* (391 Suppl), S208-18.
- Naredo, E., Cabero, F., Palop, M. J., Collado, P., Cruz, A. & Crespo, M. (2005). Ultrasonographic findings in knee osteoarthritis: A comparative study with clinical and radio-

- graphic assessment. *Osteoarthritis and cartilage*, 13 (7), 568–574.
- Nogueira-Barbosa, M. H., Greggio-Junior, E., Lorenzato, M. M., Guermazi, A., Roemer, F. W., Chagas-Neto, F. A. & Crema, M. D. (2015). Ultrasound assessment of medial meniscal extrusion: A validation study using mri as reference standard. *AJR. American journal of roentgenology*, 204 (3), 584–588.
- Pagnani, M. J., Cooper, D. E. & Warren, R. F. (1991). Extrusion of the medial meniscus. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 7 (3), 297–300.
- Patel, R., Eltgroth, M., Souza, R., Zhang, C. A., Majumdar, S., Link, T. M. & Motamedi, D. (2016). Loaded versus unloaded magnetic resonance imaging (mri) of the knee: Effect on meniscus extrusion in healthy volunteers and patients with osteoarthritis. *European journal of radiology open*, 3, 100–107.
- Petersen, W. & Tillmann, B. (1998a). Collagenous fibril texture of the human knee joint menisci. *Anatomy and embryology*, 197 (4), 317–324.
- Petersen, W. & Tillmann, B. (1998b). Funktionelle anatomie der menisken des kniegelenks kollagenfasertextur und biomechanik. *Arthroskopie*, 11 (3), 133–135.
- Podlipská, J., Guermazi, A., Lehenkari, P., Niinimäki, J., Roemer, F. W., Arokoski, J. P., Kaukinen, P., Liukkonen, E., Lammentausta, E., Nieminen, M. T., Tervonen, O., Koski, J. M. & Saarakkala, S. (2016). Comparison of diagnostic performance of semi-quantitative knee ultrasound and knee radiography with mri: Oulu knee osteoarthritis study. *Scientific reports*, 6, 22365.
- Price, D. D., McGrath, P. A., Rafii, A. & Buckingham, B. (1983). The validation of visual analogue scales as ratio scale measures for chronic and experimental pain. *Pain*, 17 (1), 45–56.
- Radin, E. L., de Lamotte, F. & Maquet, P. (1984). Role of the menisci in the distribution of stress in the knee. *Clinical orthopaedics and related research* (185), 290–294.
- Rath, E. & Richmond, J. C. (2000). The menisci: Basic science and advances in treatment. *British journal of sports medicine*, 34 (4), 252–257.
- Reider, B., Arcand, M. A., Diehl, L. H., Mroczek, K., Abulencia, A., Stroud, C. C., Palm, M., Gilbertson, J. & Staszak, P. (2003). Proprioception of the knee before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 19 (1), 2–12.
- Renström, P. & Johnson, R. J. (1990). Anatomy and biomechanics of the menisci. *Clinics in sports medicine*, 9 (3), 523–538.
- Roos, E. M., Roos, H. P., Lohmander, L. S., Ekdahl, C. & Beynonn, B. D. (1998). Knee injury and osteoarthritis outcome score (koos)—development of a self-administered outco-

- me measure. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 28 (2), 88–96.
- Saygi, B., Yildirim, Y., Berker, N., Ofluoglu, D., Karadag-Saygi, E. & Karahan, M. (2005). Evaluation of the neurosensory function of the medial meniscus in humans. *Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association*, 21 (12), 1468–1472.
- Scheerder, J. (2015). *Running across europe: The rise and size of one of the largest sport markets*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- Schueller-Weidekamm, C., Schueller, G., Uffmann, M. & Bader, T. (2006b). Incidence of chronic knee lesions in long-distance runners based on training level: Findings at mri. *European journal of radiology*, 58 (2), 286–293.
- Schueller-Weidekamm, C., Schueller, G., Uffmann, M. & Bader, T. R. (2006a). Does marathon running cause acute lesions of the knee? evaluation with magnetic resonance imaging. *European radiology*, 16 (10), 2179–2185.
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. & Wesker, K. (2011). *Allgemeine anatomie und bewegungssystem: 182 tabellen* (3., überarb. und erw Aufl., Bd. LernAtlas der Anatomie / Michael Schünke; Erik Schulte; Udo Schumacher. Ill. von Markus Voll und Karl Wesker). Stuttgart: Thieme.
- Seyfarth, H., Bülow, B. & Buchmann, J. (1973). Praktische erfahrungen mit der neutral-null-durchgangsmethode. *Beitrage zur Orthopadie und Traumatologie*, 20 (4), 228–231.
- Shrive, N. G., O'Connor, J. J. & Goodfellow, J. W. (1978). Load-bearing in the knee joint. *Clinical orthopaedics and related research* (131), 279–287.
- Son, M., Goodman, S. B., Chen, W., Hargreaves, B. A., Gold, G. E. & Levenston, M. E. (2013). Regional variation in t1rho and t2 times in osteoarthritic human menisci: correlation with mechanical properties and matrix composition. *Osteoarthritis and cartilage*, 21 (6), 796–805.
- Spahn, G., Schiele, R., Hofmann, G. O., Schiltenswolf, M., Grifka, J., Vaitl, T., Schneider, S., Liebers, F. & Klinger, H. M. (2011). Die prävalenz der radiologischen gonarthrose in bezug zu lebensalter, geschlecht, jahrgangskohorte und ethnischer zugehörigkeit. eine metaanalyse. *Zeitschrift fur Orthopadie und Unfallchirurgie*, 149 (2), 145–152.
- Stehling, C., Luke, A., Stahl, R., Baum, T., Joseph, G., Pan, J. & Link, T. M. (2011). Meniscal t1rho and t2 measured with 3.0t mri increases directly after running a marathon. *Skeletal radiology*, 40 (6), 725–735.
- Stehling, C., Souza, R. B., Le Hellio Graverand, M.-P., Wyman, B. T., Li, X., Majumdar, S. & Link, T. M. (2012). Loading of the knee during 3.0t mri is associated with significantly increased medial meniscus extrusion in mild and moderate osteoarthritis. *European journal of radiology*, 81 (8), 1839–1845.
- Stein, T., Mehling, A. P., Welsch, F., von Eisenhart-Rothe, R. & Jäger, A. (2010). Long-term

- outcome after arthroscopic meniscal repair versus arthroscopic partial meniscectomy for traumatic meniscal tears. *The American journal of sports medicine*, 38 (8), 1542–1548.
- Subburaj, K., Kumar, D., Souza, R. B., Alizai, H., Li, X., Link, T. M. & Majumdar, S. (2012). The acute effect of running on knee articular cartilage and meniscus magnetic resonance relaxation times in young healthy adults. *The American journal of sports medicine*, 40 (9), 2134–2141.
- Sugita, T., Kawamata, T., Ohnuma, M., Yoshizumi, Y. & Sato, K. (2001). Radial displacement of the medial meniscus in varus osteoarthritis of the knee. *Clinical orthopaedics and related research* (387), 171–177.
- Svensson, F., Felson, D. T., Turkiewicz, A., Guermazi, A., Roemer, F. W., Neuman, P. & Englund, M. (2019). Scrutinizing the cut-off for \dq meniscal body extrusion on knee mri. *European radiology*.
- Sweigart, M. A. & Athanasiou, K. A. (2001). Toward tissue engineering of the knee meniscus. *Tissue engineering*, 7 (2), 111–129.
- Tegner, Y. & Lysholm, J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clinical orthopaedics and related research* (198), 43–49.
- Timmins, K. A., Leech, R. D., Batt, M. E. & Edwards, K. L. (2017). Running and knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. *The American journal of sports medicine*, 45 (6), 1447–1457.
- Trattning, S., Friedrich, K. M. & Bohndorf, K. (2014). Menisken. In K. Bohndorf, N. Jorden & A. Altenburger (Hrsg.), *Radiologische diagnostik der knochen und gelenke* (S. 208–213). Stuttgart: Thieme.
- van der Bracht, H., Verdonk, R., Verbruggen, G., Elewaut, D. & Verdonk, P. (2007). Cell based meniscus tissue engineering. In Ashammakhi N., Reis RL. & Chiellini E. (Hrsg.), *Topics in tissue engineering*.
- van der Kraan, P. M. (2012). Osteoarthritis year 2012 in review: Biology. *Osteoarthritis and cartilage*, 20 (12), 1447–1450.
- Verdonk, P., Depaeye, Y., Desmyter, S., de Muynck, M., Almqvist, K. F., Verstraete, K. & Verdonk, R. (2004). Normal and transplanted lateral knee menisci: Evaluation of extrusion using magnetic resonance imaging and ultrasound. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, 12 (5), 411–419.
- Walczak, B. E., McCulloch, P. C., Kang, R. W., Zelazny, A., Tedeschi, F. & Cole, B. J. (2008). Abnormal findings on knee magnetic resonance imaging in asymptomatic nba players. *The journal of knee surgery*, 21 (1), 27–33.
- Walker, P. S. & Erkman, M. J. (1975). The role of the menisci in force transmission across the knee. *Clinical orthopaedics and related research* (109), 184–192.
- Williams, P. T. & Thompson, P. D. (2013). Walking versus running for hypertension, cholest-

terol, and diabetes mellitus risk reduction. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, 33 (5), 1085–1091.

Wilson, A. S., Legg, P. G. & McNeur, J. C. (1969). Studies on the innervation of the medial meniscus in the human knee joint. *The Anatomical record*, 165 (4), 485–491.

Zimny, M. L. (1988). Mechanoreceptors in articular tissues. *The American journal of anatomy*, 182 (1), 16–32.

Anhang

Interviewfragebogen – TransAlpineRun-Studie

Name:

Geburtsdatum:

Größe:

Gewicht:

1. Seit wann betreiben Sie intensiven Laufsport?

2. Wie häufig laufen Sie in der Woche?

3. Wie viele Kilometer laufen Sie pro Woche?

4. Welche Sportarten betreiben Sie sonst noch?

5. Wurden Sie schon mal am Knie operiert? Wenn ja, wann, was und welches Knie wurde operiert?

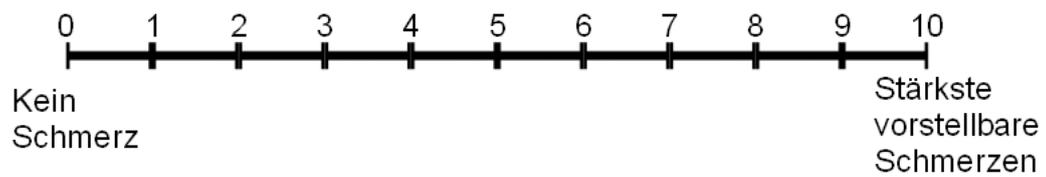
Tegner Aktivitätsskala

Mit den nachfolgenden Fragen möchten wir untersuchen, wie gut Ihre alltags- und sportartspezifische Funktion ist.

Bitte lesen Sie die nachfolgende Aufstellung durch. Beurteilen Sie Ihren Aktivitätsstatus und kreuzen Sie die betreffende Spalte an.

Aktivitätsgrad	Tätigkeit	Wertung
Wettkampfsport	Fußball, Ski alpin (auf nationalem oder internationalem Niveau)	10
Wettkampfsport	Eishockey, Ringen, Turnen, Fußball, Ski alpin (auf regionalem Niveau)	9
Wettkampfsport	Snowboard, Badminton, Squash, Leichtathletik (Sprungdisziplinen)	8
Wettkampfsport	Tennis, Leichtathletik, (Lauf- und Wurfdisziplinen), Geräteturnen, Handball, Basketball, Orientierungslauf, Crosslauf	7
Freizeitsport	Eishockey, Fußball, Ski alpin	
Freizeitsport	Badminton, Tennis, Squash, Basketball, Handball, Volleyball, Orientierungslauf, Crosslauf, Snowboard, Aerobic (high impact), Joggen (mindestens 5x die Woche)	6
Wettkampfsport	Radfahren, Skilanglauf, Eiskunstlauf	5
Freizeitsport	Turnen, Gymnastik, In-line-skating, Klettern, Bergsteigen, Skitouren, Schneeschuhlaufen, Joggen auf unebenem Boden (mindestens. 2x die Woche)	
Arbeit	Schwere körperliche Arbeit (Bauarbeit, Waldarbeit)	
Freizeitsport	Skilanglauf, Radfahren, Tanzen, Aerobic (low impact), Bergwandern (abwärts), Joggen auf ebenem Boden (mind. 2x die Woche)	4
Arbeit	Mittelschwere körperliche Arbeit (schwere Hausarbeit)	
Wettkampf- und Freizeitsport	Schwimmen, Wandern, Walking, Kegeln, Bowling	3
Arbeit	Leichte körperliche Arbeit	
Gehen	Querfeldein ist möglich	
Arbeit	Vorwiegend sitzende Tätigkeit	2
Gehen	Auf unebenem Boden möglich	
Arbeit	Sitzende Tätigkeit	1
Gehen	Nur auf ebenem Boden möglich	
Arbeit	Arbeitsunfähig oder berentet aufgrund von Knieproblemen	0
Gehen	Nur eingeschränkt möglich	

Visuelle Analogskala



„KOOS“ KNIEFRAGEBOGEN

Datum: ____/____/____ Geburtsdatum: ____/____/____

Patienten Nr: _____

ANLEITUNG: Dieser Ankreuzbogen befragt Sie, welchen Eindruck Sie von Ihrem Knie haben. Die dadurch gewonnene Information wird uns helfen zu überwachen, wie es Ihnen mit Ihrem Knie geht und wie gut Sie in der Lage sind, Ihre üblichen Aktivitäten zu verrichten.

Beantworten Sie bitte jede Frage durch ankreuzen des zugehörigen Kästchens. Bitte nur ein Kästchen pro Frage ankreuzen. Wenn Sie sich unsicher sind, wie Sie die Frage beantworten sollen, wählen Sie die Antwort aus, die Ihnen am zutreffendsten erscheint.

Symptome

Diese Fragen beziehen sich auf Beschwerden von Seiten Ihres Kniegelenkes in der **vergangenen Woche**.

S1. Haben Sie Schwellungen an Ihrem Knie?

niemals selten manchmal oft immer

S2. Fühlen Sie manchmal ein Mahlen, hören Sie manchmal ein Klicken oder irgendein Geräusch, wenn Sie Ihr Knie bewegen?

niemals selten manchmal oft immer

S3. Bleibt Ihr Knie manchmal hängen, oder blockiert es, wenn Sie es bewegen?

niemals selten manchmal oft immer

S4. Können Sie Ihr Knie ganz ausstrecken?

immer oft manchmal selten nie

S5. Können Sie Ihr Knie ganz beugen?

immer oft manchmal selten nie

Steifigkeit

Die nachfolgenden Fragen betreffen die Steifigkeit Ihres Kniegelenkes während der **letzten Woche**. Unter Steifigkeit versteht man ein Gefühl der Einschränkung oder Verlangsamung der Fähigkeit Ihr Kniegelenk zu bewegen.

Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk innerhalb der letzten Woche erfahren haben.

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

keine schwach mäßig stark sehr stark

S7. Wie stark ist Ihre KniestEIFigkeit nach dem Sie saßen, lagen, oder sich ausruhten im **Verlauf des Tages?**

keine schwach mäßig stark sehr stark

Schmerzen

P1. Wie oft tut Ihnen Ihr Knie weh?

niemals monatlich wöchentlich täglich immer

Wie ausgeprägt waren Ihre Schmerzen in der **vergangenen Woche** als Sie z.B.:

P2. sich im Knie drehen?

keine schwach mäßig stark sehr stark

P3. Ihr Knie ganz ausstrecken?

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 herauf oder heruntergehen?

keine schwach mäßig stark sehr stark

P7. nachts im Bett liegen?

keine schwach mäßig stark sehr stark

P8. saßen oder lagen, z.B. auf der Couch?

keine schwach mäßig stark sehr stark

P9. aufrecht stehen?

keine schwach mäßig stark sehr stark

Aktivitäten des täglichen Lebens

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Leistungsfähigkeit. Hierunter verstehen wir Ihre Fähigkeit sich selbständig zu bewegen bzw. sich selbst zu versorgen.

Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk innerhalb der **letzten Woche** erfahren haben.

Welche Schwierigkeiten hatten Sie **letzte Woche** als Sie z.B.:

A1. Treppen herunterstiegen?

keine wenig einige große sehr große

A2. Treppen hinaufstiegen?

keine wenig einige große sehr große

A3. vom Sitzen aufstanden?

keine wenig einige große sehr große

Welche Schwierigkeiten hatten Sie **letzte Woche** als Sie z.B.:

A4. standen?

keine wenig einige große sehr große

A5. sich bückten um z.B. etwas vom Boden aufzuheben?

keine wenig einige große sehr große

A6. auf ebenen Boden gingen?

keine wenig einige große sehr große

A7. ins Auto ein- oder ausstiegen?

keine wenig einige große sehr große

A8. einkaufen gingen?

keine wenig einige große sehr große

A9. Strümpfe/Socken anzogen?

keine wenig einige große sehr große

A10. vom Bett aufstanden?

keine wenig einige große sehr große

A11. Strümpfe/Socken auszogen?

keine wenig einige große sehr große

A12. im Bett lagen und sich drehen, ohne das Knie dabei zu beugen?

keine wenig einige große sehr große

A13. in oder aus der Badewanne kamen?

keine wenig einige große sehr große

A14. saßen?

keine wenig einige große sehr große

A15. sich auf die Toilette setzten oder aufstanden?

keine wenig einige große sehr große

A16. schwere Hausarbeit verrichteten (schrubben, Garten umgraben, ...)?

keine wenig einige große sehr große

A17. leichte Hausarbeit verrichteten (Staub wischen, kochen, ...)?

keine wenig einige große sehr große

Sport und Freizeit

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre körperliche Belastbarkeit im Rahmen eher sportlicher Aktivitäten. Für jede der nachfolgenden Aktivitäten sollen Sie das Ausmaß der Schwierigkeiten angeben, welche Sie durch Ihr Kniegelenk innerhalb der **letzten Woche** erfahren haben.

Hatten Sie Schwierigkeiten **letzte Woche** als Sie z.B.:

SP1. in die Hocke gingen?

keine wenig einige große sehr große

SP2. rannten?

keine wenig einige große sehr große

SP3. hüpfen?

keine wenig einige große sehr große

SP4. sich auf Ihrem kranken Knie umdrehen?

keine wenig einige große sehr große

SP5. sich hinknieten?

keine wenig einige große sehr große

Beeinflussung der Lebensqualität durch das betroffene Knie

Q1. Wie oft spüren Sie Ihr erkranktes Knie?

nie monatlich wöchentlich täglich immer

Q2. Haben Sie Ihre Lebensweise verändert um eventuell Ihrem Knie schadende Tätigkeiten zu vermeiden?

nicht wenig etwas stark vollständig

Q3. Wie sehr macht es Ihnen zu schaffen, daß Ihr Knie nicht stabil ist?

gar nicht wenig einiges schlimm sehr schlimm

Q4. Wie würden Sie insgesamt die Schwierigkeiten bewerten die Sie durch das Knie haben?

keine wenig etwas große sehr große

Vielen Dank für die Beantwortung aller Fragen dieses Fragebogens

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich nachfolgenden Personen ganz besonders danken:

Prof. Dr. Andreas B. Imhoff

für die Vergabe des Themas und die Möglichkeit in seiner Abteilung diese Arbeit durchzuführen.

Priv.-Doz. Dr. med. Andrea Achtnich und Priv.-Doz. Dr. med. Theresa Diermeier

für die freundliche Unterstützung und Betreuung meiner Dissertation.

Niklas Rosenstein

für die Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

Meinen Eltern

für die Ermöglichung des Studiums und die bedingungslose Unterstützung.