

Diplomarbeit

**Die Wertigkeit der MRT-Diagnostik von
Muskelverletzungen bei Fußballern und ihre
Aussagekraft bezüglich der Rekonvaleszenz**

eingereicht von

Daniel Resch, B.Sc.

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der gesamten Heilkunde

(Dr. med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Universitätsklinikum für Radiologie

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dr. Manfred Tillich

Prim. Univ.-Prof. Dr. Helmut Schöllnast, MBA

Graz, 21. Oktober 2025

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Graz, 21. Oktober 2025

Daniel Resch eh.

Danksagungen

Meinen großen Dank möchte ich an dieser Stelle allen Menschen aussprechen, die mich auf meinem Weg durch das Medizinstudium begleitet und letztendlich bei der Fertigstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Betreuern Ao.Univ.-Prof. Dr.med. univ. MBA Helmut Schoellnast und Univ.-Prof. Dr.med. univ. Manfred Tillich für die stets verlässliche und professionelle Betreuung im gesamten Prozess bedanken.

Des Weiteren möchte ich meiner Lebensgefährtin Anja Krasser von Herzen danken, die mich über das ganze Studium hinweg mit Verständnis und Zuspruch stets unterstützt hat. Ohne dich wäre all dies nicht möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, Ingrid und Walter, die mich auf meinem Lebensweg mit viel Geduld und Liebe unterstützt haben. Durch euer Vertrauen in mich konnte ich meinen eigenen Weg gehen und bin euch zeitlebens dafür dankbar.

Abschließend möchte ich besonders meinem Großvater, Gerhard Sommerauer, danken, zu dessen großer Überraschung ich es tatsächlich in das Medizinstudium geschafft habe. Diese Arbeit, die das Ende meines Studiums markiert, widme ich ihm in liebevoller Erinnerung.

Zusammenfassung

Einleitung: Muskelverletzungen zählen im Profifußball zu den häufigsten Ursachen für Ausfallzeiten. Die Magnetresonanztomographie hat sich dabei als zentrales diagnostischen Verfahren etabliert. Obwohl derzeit eine Vielzahl an MRT-Klassifikationssysteme vorliegen, besteht weiterhin kein Konsens über deren prognostische Relevanz. Auf dieser Grundlage wurde das Bildmaterial des Studienkollektivs mit den gebräuchlichsten Klassifikationssystemen abgeglichen und den klinischen Informationen gegenübergestellt. Ziel dieser Arbeit war es, die prognostische Wertigkeit der MRT-Diagnostik bei Muskelverletzungen und ihre Aussagekraft bezüglich der Rekonvaleszenz zu untersuchen.

Methoden: In einer retrospektiven, monozentrischen Beobachtungsstudie wurden 79 Muskelverletzungen von 51 Profifußballern einer Fußballmannschaft aus der höchsten österreichischen Spielklasse über einen Zeitraum von 7,5 Jahren dokumentiert. Die Patientendaten wurden im Vorfeld aus der klinischen Patientenakte und der Fußballplattform Transfermarkt erhoben und analysiert. Das dazugehörige MRT-Bildmaterial wurde von einem habilitierten Facharzt für Radiologie mit ausgewiesener Erfahrung in der muskuloskelettalen Bildgebung sowie einem Facharzt für Radiologie ohne spezielle muskuloskelettale Schwerpunktqualifikation im Rahmen einer Interobserver-Variabilitätsstudie untersucht und nach den Klassifikationssystemen, Munich, BAGIC und MLG-R beurteilt. Zur statistischen Auswertung wurden Julius AI und IBM SPSS Statistics eingesetzt.

Ergebnisse: Von den insgesamt 79 dokumentierten Muskelverletzungen, konnten 69 in die MRT-Analyse eingeschlossen werden. Bei beiden Radiologen zeigte sich eine statistisch signifikant positive Korrelation zwischen der Längsausdehnung einer Läsion und der Ausfallzeit (R1: $\rho = 0.345$, R2: $\rho = 0.397$). Ebenso ließ das Vorliegen als auch die Breite eines epifaszialen Ödems signifikant längere Ausfallzeiten erkennen ($p < 0,05$), beim Hämatom hingegen nicht. Auch wenn myotendinöse Läsionen im Vergleich zu subfaszialen bei beiden Ratern tendenziell längere Ausfallzeiten zur Folge hatten, ließ sich keine statistische Korrelation feststellen ($p > 0,05$). Alle drei Klassifikationssysteme zeigten mäßige bis moderate Übereinstimmungswerte zwischen den Ratern (Munich: $\kappa = 0,387$; BAGIC: $\kappa = 0,533$; MLG-R: $\kappa = 0,509$), wengleich BAGIC ($\rho = 0.31$) die stärkste und MLG-R ($\rho = 0.24$) die zweitstärkste Korrelation mit der Ausfallzeit ergab.

Schlussfolgerung: Die Ergebnisse konnten kritische MRT-Merkmale als prognostisch relevant identifizieren. Während Munich diese kritischen Merkmale nicht enthält, integrieren BAGIC und MLG-R einige davon in ihren Klassifikationssystemen. Dieser Umstand könnte die in anderen Studien bereits mehrfach attestierte bessere prognostische Aussagekraft dieser beiden Systeme erklären. Außerdem verdeutlicht die Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Radiologen die Subjektivität der radiologischen Befundung. Die Tatsache, dass bei beiden Ratern innerhalb derselben Klassifikationssysteme nie übereinstimmend eine Korrelation zwischen dem Schweregrad einer Verletzung und der Ausfallszeit festgestellt wurde, unterstreicht die Notwendigkeit weiterführender Forschung. Prospektive, multizentrische Studien mit standardisierten Bewertungsprotokollen sind erforderlich, um die prognostische Relevanz der MRT bei Muskelverletzungen in Zukunft besser beurteilen zu können.

Abstract

Purpose: Muscle injuries are one of the most common causes for absence in professional football. MRI has established itself as the central diagnostic imaging method. Although there are currently a variety of MRI classification systems available, there is still no consensus on their prognostic relevance. For this reason, the imaging data from the study group was analyzed with the most common classification systems and compared it with clinical information. The aim of the study was to investigate the prognostic value of MRI diagnostics in muscle injuries and its significance in terms of recovery time.

Methods: In a retrospective, single-center, observational study, 79 muscle injuries sustained by 51 professional footballer players from a football team in the highest Austrian league were documented over a period of 7.5 years. The patient data was collected and analyzed in advance from clinical patient records and the football platform “Transfermarkt”. The corresponding MRI images were examined by a habilitated radiologist with proven experience in musculoskeletal imaging and a radiologist without special musculoskeletal qualifications as part of an interobserver variability study and assessed according to the Munich, BAGIC and MLG-R classification systems. Julius AI and IBM SPSS Statistics were used for statistical analysis.

Results: Of the total of 79 documented muscle injuries, 69 could be included in the MRI analysis. Both radiologists found a statistically significant positive correlation between the longitudinal extent of a lesion and the downtime (R1: $\rho = 0.345$, R2: $\rho = 0.397$). Similarly, the presence and width of epifascial oedema were associated with significantly longer downtime, whereas hematoma was not. Although myotendinous lesions tended to result in longer downtime than subfascial lesions in both raters, no statistical correlation was found. All three classification systems showed mild to moderate agreement between raters (Munich: $\kappa = 0.387$; BAGIC: $\kappa = 0.533$; MLG-R: $\kappa = 0.509$), although BAGIC ($\rho = 0.31$) showed the strongest correlation with time out and MLG-R ($\rho = 0.24$) showed the second strongest correlation.

Conclusion: The results identified critical MRI features as prognostically relevant. While Munich does not include these critical features, BAGIC and MLG-R integrate some of

them into their classification systems. This circumstance might explain the greater prognostic significance of these two systems, which has been repeatedly reported in other studies. Furthermore, the comparison of the two radiologists' results highlights the subjectivity of radiological diagnosis. The fact that the two raters never found a concordant correlation between the severity of an injury and the downtime within the same classification systems underscores the need for further research. Prospective, multicenter studies with standardized assessment protocols are needed to better assess the prognostic relevance of MRI in muscle injuries in the future.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und deren Erklärung	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Einleitung	5
1.1 <i>Anatomische Grundlagen der Skelettmuskulatur</i>	<i>5</i>
1.1.1 Architektur der Skelettmuskulatur	5
1.1.2 Muskelfasertypen	6
1.1.3 Muskeltypen	7
1.1.4 Anatomische Besonderheiten der Skelettmuskulatur der unteren Extremität	8
1.1.5 Anatomie und Physiologie von Muskelverletzungen	12
1.2 <i>Muskelverletzungen im Fußball</i>	<i>15</i>
1.2.1 Definition „Verletzung“ und „Verletzungsschwere“	15
1.2.2 Epidemiologie von Muskelverletzungen	16
1.2.3 Klassifikation von Muskelverletzungen	16
1.3 <i>Magnetresonanztomographie der Skelettmuskulatur</i>	<i>27</i>
1.3.1 Physikalische Grundlagen der MRT	27
1.3.2 MRT- Untersuchungstechniken: Normalbefund und Pathologie	29
1.3.3 MRT- Protokoll	31
2 Material und Methoden	33
2.1 <i>Studiendesign und Zielsetzung</i>	<i>33</i>
2.2 <i>Studienkollektiv</i>	<i>33</i>
2.3 <i>Bildgebung und Untersuchungstechniken</i>	<i>34</i>
2.4 <i>Datenerhebung</i>	<i>34</i>
2.5 <i>Statistische Auswertung</i>	<i>35</i>
2.6 <i>Ethik und Datenschutz</i>	<i>36</i>
3 Ergebnisse	37
3.1 <i>Erhobene Patientendaten</i>	<i>37</i>
3.2 <i>Ergebnisse der MRT-Diagnostik</i>	<i>42</i>
3.3 <i>Korrelation von Klinik und MRT</i>	<i>47</i>
4 Diskussion	52
4.1 <i>Wertigkeit der MRT-Diagnostik und deren Aussagekraft für die Rekonvaleszenz</i>	<i>52</i>
4.2 <i>Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Studienlage</i>	<i>53</i>
4.3 <i>Limitationen und Ausblick für Praxis und Forschung</i>	<i>57</i>
5 Literaturverzeichnis	60

Abkürzungen und deren Erklärung

%	Prozent
°	Grad
Abb.	Abbildung
AUC	Area under Curve
AUVA	Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
BAMIC	British Athletics Muscle Injury Classification
BFlh	Biceps femoris long head
BFsh	Biceps femoris short head
Ca	Kalzium
cm	Zentimeter
CSA	Cross-Sectional Area
DMTJ	Distal Muscle-Tendon Junction
et al.	Et alii (und andere)
EZM	Extrazellulärmatrix
FC	Football Club
FOV	Field of View
FS	Fettsättigung
FSE	Fast Spin Echo
FSPD	Fast Spin Echo Proton Density
H	Wasserstoff
HF	Hochfrequenz
ICC	Intraclass Correlation Coefficient
LKH	Landeskrankenhaus
Lw	Longitudinal weighted
Max	Maximum
Md.	Median
Min	Minimum
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
MTJ	Muscle-Tendon Junction

MW	Mittelwert
Mz	Längsmagnetisierung
NSAR	Nichtsteroidale Antirheumatika
PDw	Protonendichte-gewichtete Sequenz
R1	Radiologe 1
R2	Radiologe 2
ROC	Receiver Operating Characteristics
RTP	Return to Play
SM	Semimembranosus
SD	Standardabweichung
STIR	Short-Tau-Inversion-Recovery-Sequenz
T	Tesla
TIRM	Turbo Inversion Recovery Magnitude
T1w	T1-gewichtete Sequenz
T2w	T2-gewichtete Sequenz
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit
TSE	Turbo Spin Echo
UEFA	Union of European Football Associations
z. B.	zum Beispiel
κ	Cohens Kappa-Koeffizient
ρ	Spearman's Rho

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 a-e: schematische Darstellung des Hamstring-Komplexes (12).....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Musculus rectus femoris (12).....	10
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Musculus soleus (12).....	11
Abbildung 4: Entwicklungsstadien eines Hämatoms in T1 und T2 (22)	31
Abbildung 5: Verteilung der Verletzungsumstände	37
Abbildung 6: Monatliche Verteilung der Verletzungen	38
Abbildung 7: Ausfallzeiten nach FIFA Injury Severity Classification	39
Abbildung 8: Korrelation der Ausfallzeiten nach Alter- und Altersgruppen	40
Abbildung 9: Verteilung der betroffenen Muskeln (R1 vs. R2).....	43
Abbildung 10: ROC Curves for Severe (>28 Tage) Injuries.....	49
Abbildung 11: Muskelfaserriss des M. biceps femoris.	50
Abbildung 12: Muskelbündelriss des M. rectus femoris.....	50
Abbildung 13: Proximale Ruptur der Sehne des M. semimembranosus.....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: München-Klassifikation in Anlehnung an (1).....	19
Tabelle 2: BAMIC in Anlehnung an (28).....	22
Tabelle 3: MLG-R Klassifikation in Anlehnung an (44)	25
Tabelle 4: Charakteristika des Studienkollektivs	41
Tabelle 5: Klassifikationen - Häufigkeiten und Prozentangaben	46

Einleitung

1.1 Anatomische Grundlagen der Skelettmuskulatur

Zu Beginn dieser Arbeit werden dem Leser*in die wesentlichen anatomischen Grundlagen der Skelettmuskulatur vermittelt, um ein besseres Verständnis für die später behandelten Themen der Muskel-MRT-Diagnostik zu ermöglichen.

1.1.1 Architektur der Skelettmuskulatur

Die quergestreifte Muskulatur des Bewegungsapparats wird Skelettmuskulatur genannt und macht beim Erwachsenen bis zu 40 % des gesamten Körpergewichts aus. Beim austrainierten Leistungs- bzw. Kraftsportler*in kann die Muskelmasse dabei bis zu 65 % des Körpergewichts betragen. Im menschlichen Organismus existieren über 640 Skelettmuskeln, die sich durch unterschiedliche Größe, Form und Faserarchitektur unterscheiden. (1)

Der Skelettmuskel besteht aus mehreren Muskelfaszikeln (Faserbündeln), die durch lockeres Bindegewebe, Faszien und letztendlich von einer oberflächlichen Muskelfaszie zusammengehalten werden. Neben seiner Schutz- und Stabilisierungsfunktion kommt dem muskulären Bindegewebeapparat eine bedeutsame Aufgabe bei der inneren und äußeren Kraftübertragung des Muskels zu. Jeweils endseitig des kontraktiven Muskelbauchs (Venter) strahlen die Kollagenfasern der Sehne in die Zytoplasmamembran der einzelnen Muskelfaser ein und stellen somit den myotendinösen Kontakt (Myotendinous Junction, MTJ) dar. Am Knochen sind die Kollagenfaserbündel der Sehne über eine Matrix aus mineralisiertem und nicht mineralisiertem Faserknorpel fixiert. (1)

Die Muskelfaszien, auch als Muskelbinde bezeichnet, sind Schichten aus straffem kollagenem Bindegewebe und halten als flächige Hüllstrukturen einzelne Muskeln und ganze Muskelgruppen zusammen (2). An jenen Stellen, wo Gruppenfaszien aneinanderliegen, entstehen sogenannte Septen (Septum intermusculare) (1). Zwischen Muskelbauch und Muskelfaszie, in dem auch Blut-, Lymph- und Nervengefäße zum Muskelbauch ziehen, sorgt die äußerste Bindegewebshülle (Epimysium) für ein optimales Gleiten zwischen Muskel und Faszie (1). Durch die scheringitterartige Struktur der Kollagenfasern kann sich die Faszie bei Kontraktion und Relaxation an Situationen anpassen (1).

Ein Muskel ist im Inneren in kleinere und größere Muskelfaserbündel (Primär- und Sekundärbündel) gegliedert, die ebenso durch lockeres Bindegewebe voneinander abgegrenzt sind. Vom Epimysium ausgehend treten bindegewebige Septen (Perimysium) in den Muskel ein und umhüllen die millimeterdicken Sekundärbündel, die umgangssprachlich auch „Fleischfasern“ genannt werden und mit dem freien Auge sichtbar sind. Durch weitere bindegewebige Septen (Perimysium externum) werden die Sekundärbündel in einzelne Muskelfaserbündel unterteilt. Diese Faserbündel, auch als Primärbündel bezeichnet, sind ebenso von bindegewebigen Septen (Perimysium internum) umgeben, weisen eine Fläche von 1 mm² auf und fassen durchschnittlich ca. 250 einzelne Muskelfasern. (1)

Eine Muskelfaser hat eine Querschnittsfläche von 1 bis 7 mm² und weist eine Dicke von 0,2-0,5 mm auf, was dem Durchmesser eines Spinnfadens entspricht (1). Während Muskelfasern eines Skelettmuskels in ihrer Dicke und ihrem Durchmesser annähernd gleich sind, können sie sich in ihrer Länge, von wenigen Millimetern bis zu 20 cm, erheblich unterscheiden (3). Die Faser selbst wird von einer Zellmembran (Sarkolemm) und einer dünnen bindegewebigen Schicht (Endomysium) umgeben (1). Von ihr aus ziehen Axonkollaterale der intramuskulären Nerven zu den neuromuskulären Endplatten jeder Muskelfaser, wo die Erregungsübertragung auf den Muskel stattfindet (1). Im Endomysium liegen Mikrokapillar- und Gefäßnetzwerke in unmittelbarer Nähe zu den einzelnen Muskelfasern (1).

Die kontraktile Myofilamente Aktin und Myosin, die die kleinste funktionelle Einheit der Muskulatur darstellen und auch als Sarkomer bezeichnet werden, sind zu mehreren Myofibrillen zusammengelagert. Eine Skelettmuskelfaser fasst dabei mehrere Hundert bis Tausend Myofibrillen, die in Form von Bündeln die gesamte Muskelfaser (=Muskelzelle) ausfüllen. (2)

1.1.2 Muskelfasertypen

Skelettmuskeln von Erwachsenen besitzen je nach Anforderung und Lageposition im menschlichen Körper genetisch festgelegte Fasertypen (Typ-I- und -II-Fasern) und können nach Enzymmuster der Energiebereitstellung als oxidativ und glykolytisch unterschieden werden. (1)

Slow Twitch Fasern (Typ-I-Fasern) zeichnen sich durch eine erhöhte Konzentration an Myoglobin und Mitochondrien aus und nutzen primär den oxidativen Stoffwechsel zur Energiebereitstellung. Diese langsam zuckenden Fasern (niedrige Kontraktionsfrequenz

bzw. Aktinomyosin-ATPase-Aktivität) zeichnen sich durch eine hohe Ermüdungsresistenz aus und kommen überwiegend in Ausdauer- bzw. Haltemuskeln vor. (1, 3)

Fast Twitch Fasern (Typ-II-Fasern) besitzen unterschiedlich viele Mitochondrien und beziehen ihre Energie vor allem durch hohen glykolytischen Stoffwechsel. Typ-II-Fasern sind schnell zuckend (hohe Kontraktionsfrequenz), weisen aber eine raschere Ermüdbarkeit auf. Das sarkoplasmatische Retikulum ist bei Typ-II-Fasern im Vergleich zu Typ-I-Fasern nicht nur um 50 % größer, was eine schnellere Ca^{2+} Freisetzung und -Wiederaufnahme ermöglicht, sondern besitzt zudem auch eine 3-mal höhere Aktivität der Aktomyosin-ATPase. Dies ermöglicht eine um 25 % schnellere Kraftentwicklung als jene der Typ-I-Fasern. Je nach Muskelaktivierung können im menschlichen Körper unterschiedliche Übergangsformen (Typ IIa, IIb oder IIc/IIx) der Schnellkraftfasern vorhanden sein, die sich hinsichtlich ihrer physiologischen, metabolischen und histochemischen Merkmale unterscheiden. (2, 3).

Aufgrund der Muskelfaserplastizität lässt sich das Faser-Typen-Muster eines Skelettmuskels durch intensives Training oder auch längere Trainingspausen bzw. Immobilisation deutlich verschieben und ist nicht auf das genetisch festgelegte Verteilungsmuster der Fasertypen beschränkt. (1)

1.1.3 Muskeltypen

Je nach Faserverlauf, Form und seiner Gelenksbeteiligung kann ein Skelettmuskel in verschiedene Muskeltypen eingeteilt werden (2)

Die Ausrichtung der Muskelfasern ist sowohl für die Muskelarchitektur als auch für die Kraftausbeute und Funktion eines Skelettmuskels von entscheidender Bedeutung (1). Dabei können Skelettmuskeln mit einem gefiederten oder parallelen Faserverlauf unterschieden werden (1). Bei Muskeln mit paralleler Faserausrichtung, wie beispielsweise dem M. sartorius oder dem M. biceps femoris, verlaufen die Fasern in Längsrichtung zur Sehne und ermöglichen weniger kraftvolle, aber dafür ausgiebige Bewegungen (1, 3). Gefiederte Muskeln zeichnen sich durch einen charakteristischen Fiederungswinkel der Fasern an der Sehne aus, wobei eine weitere Unterteilung in unipennate und bipennate Muskeln möglich ist (2). Aufgrund der schrägen Ausrichtung der Sehnen setzen gleichzeitig mehr Fasern an der Sehne an und vergrößern dadurch den physiologischen Gesamtquerschnitt und demnach auch die wirksame Muskelkraft (1). Einzelne Muskelfaserbündel können auch intramuskulär

durch Zwischensehnen miteinander verbunden sein. Bei Verbindungen dieser Art variiert der Fiederungswinkel zwischen kontrahierten und ruhenden Zuständen erheblich und beeinflusst somit auch die Schnelligkeit und Kraftausbeute der Muskelkontraktion (1).

Muskeln können sich auch in ihrer Form unterscheiden. Ein platter Muskel (*M. planus*), wie sie beispielsweise in der Rückenmuskulatur vorkommt, geht in eine platte Sehne (Aponeurose) über. Spindelförmige Muskeln (*M. fusiformis*) verjüngen sich beim Übergang in die Sehne. Bei mehrköpfigen Muskeln entspringen mehrere Muskelbäuche an einer Ursprungssehne, sind durch Zwischensehnen miteinander verbunden und vereinigen sich jeweils wieder an einer gemeinsamen Ansatzsehne. Dabei können zweiköpfige (z.B. *M. biceps brachii*), dreiköpfige (z.B. *M. triceps brachii*) oder auch vierköpfige (z.B. *M. quadriceps femoris*) Muskeln unterschieden werden. (2) Ein Muskel kann je nach Gelenkbeteiligung als ein- oder mehrgelenkig bezeichnet werden und somit Bewegungen in mehr als einem Gelenk ausführen (2).

1.1.4 Anatomische Besonderheiten der Skelettmuskulatur der unteren Extremität

Muskelverletzungen im Fußball betreffen hauptsächlich die Muskulatur der unteren Extremität (7). Im folgenden Abschnitt werden die am häufigsten von Verletzungen betroffenen Muskeln und Muskelgruppen sowie deren anatomische Besonderheiten beschrieben.

Hamstrings

Die Muskelgruppe der Oberschenkelrückseite ist komplex aufgebaut und besteht aus dem langen und kurzen Kopf des *Musculus biceps femoris* (BF_{lh}, BF_{sh}), dem *Musculus semitendinosus* (ST) und dem *Musculus semimembranosus* (SM). Ihre Muskelfasern weisen großteils eine unipennate Ausrichtung auf. (12)

Der gemeinsame proximale Sehnenursprung des Hamstring-Komplexes befindet sich am posteromedialen Abschnitt des *Tuber ischiadicum* und wird durch eine tendinöse Insertion der BF_{lh} und ST gebildet (Abb. 1a). Der ST inseriert zudem auch oft direkt am *Tuber ischiadicum* (myo-ossäre Insertion). Beide bilden ausgehend vom *Tuber ischiadicum* eine gemeinsame Sehne, die in eine gemeinsame Aponeurose (Sehnenplatte) übergeht, wobei

jede dieser Sehnen wiederum eine eigene Aponeurose bildet (Abb. 1b). Der BFsh entspringt am posterolateralen Abschnitt des Femurs entlang der Linea aspera, vereinigt sich am distalen Anteil des Oberschenkels mit der BFlh zu einer flächigen Aponeurose und setzt mit einer gemeinsamen distalen Sehne am Fibulaköpfchen (Caput fibulae) an (Abb. 1c). Der distale myotendinöse Übergang (DMTJ) des M. biceps femoris weist eine komplexe mehrteilige Anatomie auf. Der dabei entstehende tiefe und oberflächliche Anteil, vergleichbar im Aufbau mit einem Reißverschluss (engl. deep/superficial Zipper), ist von großer prognostischer Relevanz (Abb. 1d). Läsionen in diesem Bereich zeigen hohe Rezidivraten, selbst bei längeren Rehabilitationszeiten. (12)

Separat und anterolateral zum gemeinsamen Ursprung der BFlh und ST liegt der eigenständige Ursprung des SM. Die Muskelfasern lassen sich entsprechend ihres Ursprungs in drei Abschnitte unterteilen (Abb. 1e). Zum einen können sie dem Inneren (medialen), dem inneren und äußeren (lateralen) sowie dem distalen myoaponeurotischen Abschnitt, der Sehne, entspringen. Letztere zwei sind prognostisch ungünstiger als Läsionen im medialen Abschnitt. (12)

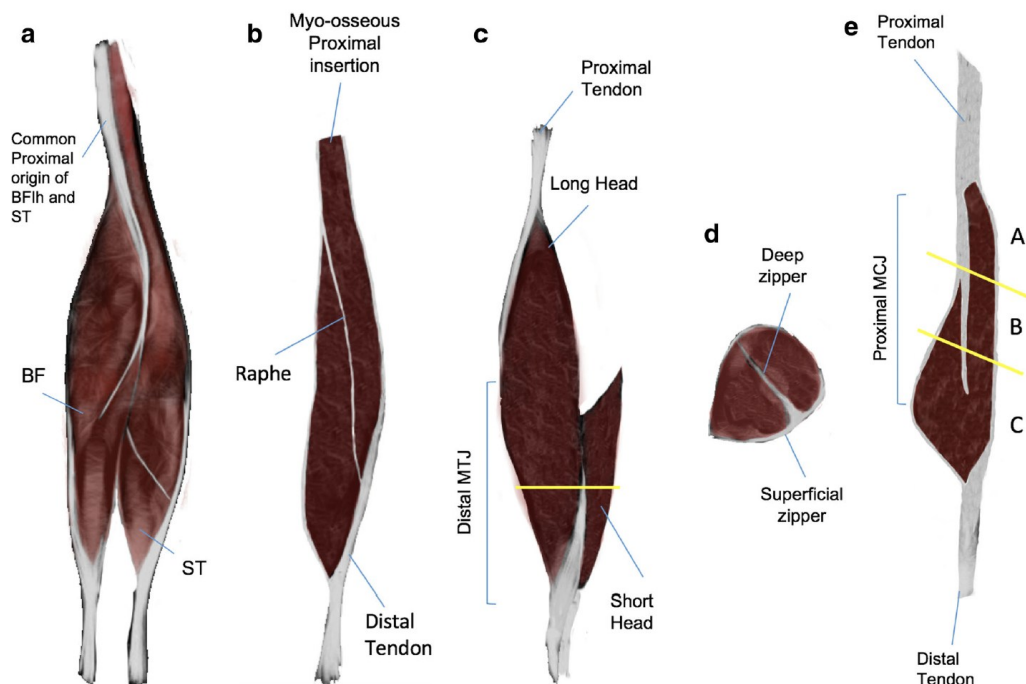


Abbildung 1 a-e: schematische Darstellung des Hamstring-Komplexes (12)

M. rectus femoris

Der Rectus femoris ist durch eine komplexe Verteilung von Bindegewebe, einschließlich einer zentralen Sehne, Septum, Aponeurose und Faszie, charakterisiert. Der Ursprung des Muskels hat zwei Anteile: eine direkte Sehne, die von der Spina iliaca anterior superior entspringt, und eine indirekte Sehne, die am oberen Rand des Acetabulums ihren Ursprung hat. Proximal setzt sich die direkte Sehne in einer anterioren Aponeurose bzw. Faszie fort, während ein zentrales Septum die intramuskuläre Fortsetzung der indirekten Sehne darstellt. Die Bindegewebsdicke wird dabei von proximal nach distal dünner. Distal setzt sich die Sehne in einer posterioren Aponeurose bzw. Faszie fort. Die Bindegewebsdicke wird dabei von proximal nach distal dicker. Läsionen des zentralen Septums und der anterioren Aponeurose zeigen signifikant längere Ausfallszeiten (6–7 Wochen) als Verletzungen der anterioren Faszie (2–3 Wochen). (12)

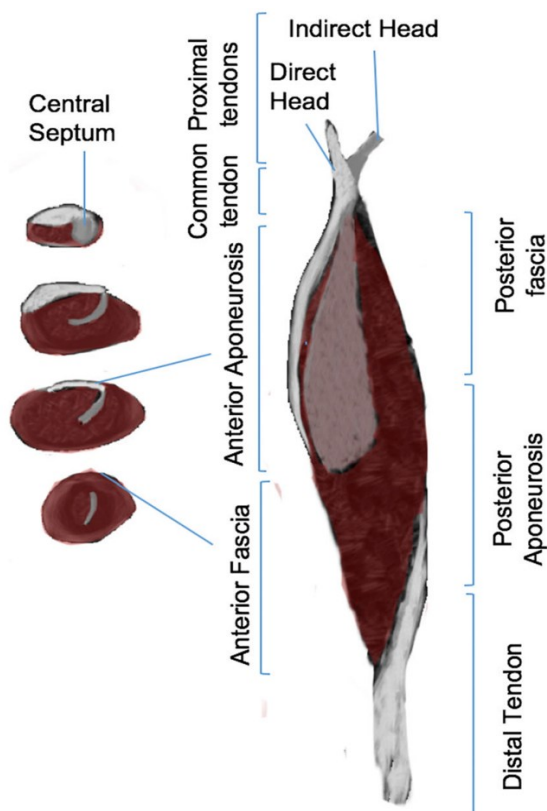


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Musculus rectus femoris (12)

M. Adductor Longus

Die Adduktorenloge setzt sich aus den Muskeln M. adductor longus, M. adductor brevis und M. adductor magnus sowie M. pectineus und M. gracilis zusammen. Von all diesen Muskeln ist der Adductor longus am häufigsten von Verletzungen betroffen. Er entspringt vom vorderen Schambeinast direkt unterhalb des Tuberculum pubicum und setzt sich in seinem fächerförmigen Verlauf, beginnend mit einem kurzen proximalen Sehnenanteil, der eine intramuskuläre Aponeurose bildet, bis zum mittleren Drittel der Linea aspera des Femurs fort, wo er ansetzt. Am häufigsten treten Verletzungen dabei am proximalen Muskel-Sehnen-Abschnitt auf, während distale Sehnenabrissse äußerst selten vorkommen. (12)

Wadenmuskulatur

Verletzungen der Wadenmuskulatur betreffen den M. soleus oder die beiden Köpfe des M. gastrocnemius. Die Struktur des Bindegewebes im M. soleus ist komplex und beinhaltet mediale und laterale Faszikel, ein zentrales Septum sowie eine posteriore Aponeurose. Zusätzlich besteht eine hohe individuelle Variabilität in der Anordnung und Morphologie dieser genannten Strukturen. Der distale Übergang des medialen Gastrocnemiuskopfes in die Achillessehne stellt jedoch einen Schwachpunkt dar und ist häufig Ort einer Verletzung. (12)

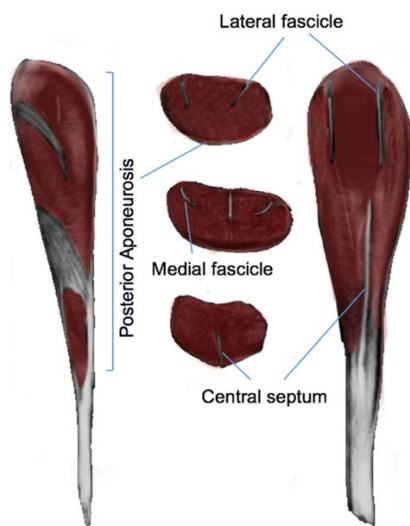


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Musculus soleus (12)

1.1.5 Anatomie und Physiologie von Muskelverletzungen

Pathomechanismus von Muskelverletzungen

Muskelverletzungen können durch äußere Krafteinwirkung, durch innerhalb des Muskels erzeugte Kräfte oder durch eine Kombination von inneren und äußeren Kräften erzeugt werden (4).

Direkte Muskelverletzungen resultieren aus stumpfer externer Krafteinwirkung und führen in der Regel zu keiner Strukturunterbrechung des Muskelgewebes (4). Bei direkten Traumata wie Kontusionen oder Lacerationen kommt es vielmehr zu einer diffusen oder umschriebenen Einblutung und in weiterer Folge zur Verdrängung oder Kompression der Muskulatur (1). Speziell die nach anterior und lateral exponierten Muskeln der Quadrizepsmuskulatur sowie die Wadenmuskulatur sind bei Kontaktsportarten häufig betroffen (1).

Indirekte Muskelverletzungen hingegen werden ohne externe Krafteinwirkung verursacht (1). Ihnen geht meist eine exzentrische Belastung durch Zug und Dehnung der Muskulatur voraus (4). Durch eine abrupt einwirkende, über die Elastizitätsgrenze des Muskels hinausgehende Kraft und gleichzeitige Kontraktion kommt es zu einer Längsdehnung des Muskels (1). In weiterer Folge kommt es zu einer longitudinalen Zerstörung der Muskelarchitektur, häufig im Bereich des myotendinösen Übergangs (4). Diese Gewebeschnittstelle, die den schwächsten Punkt eines Muskels darstellt, ist besonders anfällig für Verletzungen (1). Meist treten sie bei abrupten Beschleunigungs- und Abbremsbewegungen eines kontrahierten, vorgedehnten Muskels auf (21). Zweigelenkige Muskeln, beispielsweise der M. gastrocnemius oder die Ischiokruralmuskulatur, zeigen eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber Läsionen dieser Art (21).

Ultra- und strukturelle Muskelverletzungen

Sowohl auf mikro- als auch auf makrostruktureller Ebene beginnt die initiale Muskelschädigung im Bereich der Myofilamente auf Höhe der Sarkomere (4). Aufgrund von exzentrischen Belastungen durch Zugkräfte oder Muskelkontraktion kommt es zur Überdehnung auf Sarkomerniveau (4). Wenn es in der Folge zum Verlust der Überlappung von Aktin- und Myosinfilamenten kommt und die Überdehnung der Sarkomere sich auf das benachbarte Sarkolemm überträgt, werden auch weitere stabilisierende Strukturen des

Sarkomers geschädigt (4). Die Zerstörung der akzessorischen Proteine Titin und Nebulin, die als stabilisierende Elemente der Aktin- und Myosinfilamente fungieren und zusätzlich die Überlappung der Filamente bei Muskeldehnung gewährleisten, führt zur Ruptur der Muskelfaser (1, 4).

Ultrastrukturelle Muskelverletzungen zeichnen sich wie oben beschrieben durch strukturelle Veränderungen im Bereich der Sarkomere aus (4). Ebenso kommt es zu Umbauvorgängen der Extrazellulärmatrix (4). Bei dieser Art von Verletzung kommt es zu keinem strukturellen Schaden im Muskelgewebe (1). Vielmehr kommt es zu einer Freisetzung von proinflammatorischen, vasoaktiven Stoffen und metabolischen Faktoren (4). Dies führt zu einer veränderten Gewebemöostase im Muskel (4). Es werden Schmerzrezeptoren aktiviert und Gefäße erweitert, was eine interstitielle Flüssigkeitsansammlung zur Folge hat und auch in MRT-Untersuchungen sichtbar gemacht werden kann (4). Die veränderte Gewebemöostase geht häufig mit einer Muskelverhärtung bzw. Tonuserhöhung einher, die durch die interstitielle Flüssigkeitsakkumulation (Ödem) im Perimysium und Epimysium erklärbar ist (4). Der Übergang zwischen Anpassungsvorgängen der Muskulatur nach Belastung und ultrastrukturellen Muskelverletzungen ist jedoch fließend (4). Physiologische Beanspruchungen der Muskulatur, deren Ausmaß von Parametern wie Dauer, Intensität und Belastungsform abhängt, induzieren vergleichbare metabolische Prozesse wie ultrastrukturelle Schädigungen der Muskelzellen (4).

Strukturelle Muskelverletzungen zeichnen sich durch Schädigung von primären und sekundären Muskelfaserbündeln und ihren umliegenden Strukturen aus (4). Bei umfangreichen strukturellen Schäden des Muskelgewebes können auch Kapillaren und bindegewebige Hüllstrukturen geschädigt werden. Die meisten strukturellen Muskelverletzungen sind indirekte Muskelverletzungen (4). Bei strukturellen Muskelverletzungen kann der Grad der Schädigung deutlich variieren (4). Von der Zerreißung einzelner Primärbündel mit einem Durchmesser von weniger Millimeter bis hin zu komplexeren Verletzungen mehrerer Sekundärbündel (4). In seltenen Fällen tritt eine Zerreißung ganzer Muskeln mit oder ohne die umhüllende Muskelfaszie sowie der zugehörigen Gefäße auf (4). Insbesondere bei Gefäßbeteiligung kann es zur Einblutung in den Verletzungsbereich kommen (4). Die entstehende Hämatombildung führt zu einer Raumforderung und hat großen Einfluss auf die Muskelheilung (4).

1.1.5.1 Verletzungs- und Heilungsphasen der Muskulatur

Ultrastrukturelle und strukturelle Muskelverletzungen unterliegen einem komplexen Heilungsprozess, der in vier überlappende Phasen gegliedert werden kann: Destruktions-, Entzündungs-, Reparatur- und Remodulationsphase (4). Die Zeitdauer und der Ablauf dieser Phasen sind abhängig vom Schweregrad der Muskelverletzung (4).

In der **Destruktionsphase** (Tag 0–4) kommt es zur Schädigung von Muskelgewebe, die je nach Schweregrad von mikroskopischen Läsionen bis hin zu kompletten Muskelrissen reichen kann (1, 4). An den Rupturrändern der Muskelfasern bilden sich sogenannte Kontraktionsbänder, die verhindern, dass es zu einem weiteren Einreißen der Muskelfaser über ihre gesamte Länge kommt (4). Die geschädigten Zellen gehen durch Nekrose zugrunde und durch Einblutungen in das Gewebe kann es je nach Ausmaß der Verletzung zur Bildung eines Hämatoms kommen (1).

In der **Entzündungsphase** (Tag 1–7) kommt es zum Eindringen von Entzündungszellen in das Verletzungsgebiet (4). Zunächst Neutrophile Granulozyten, gefolgt von Makrophagen, wandern in das betroffene Gebiet ein und phagozytieren Zelltrümmer (4). Dabei setzen sie Zytokine frei, die den Heilungsprozess regulieren (4). Eine zu starke oder zu schwache Entzündungsreaktion kann den Heilungsverlauf negativ beeinflussen (4). Dies kann beispielsweise durch eine medikamentöse Behandlung mit Entzündungshemmern wie NSAR verursacht werden (4). In solchen Fällen kommt es häufig zu einer verzögerten Wundheilung (4). Außerdem kann der Gewebeersatz minderwertig ausfallen (4).

Durch die Entzündung erhöht sich die Durchlässigkeit der Blutgefäße. Dadurch sammelt sich vermehrt Flüssigkeit im Interstitium an. Diese Flüssigkeitsansammlung stört die lokale Homöostase im Gewebe. Der betroffene Muskel erhält dadurch eine prall-elastische Beschaffenheit (1). Zusätzlich kann eine gestörte Kalziumhomöostase innerhalb der Muskelfasern die Muskelverhärtung verstärken (1).

In der **Reparaturphase** (Tag 2–21) kommt es zur Aktivierung von Satellitenzellen, welche sich zwischen der Basalmembran und dem Sarkolemm der einzelnen Muskelfasern befinden (1). Nach Aktivierung verschmelzen die Satellitenzellen mit den verbliebenen Muskelfasern und bilden sogenannte Myotuben, die Vorläufer von Muskelfasern, oder proliferieren und

differenzieren sich im Rahmen eines komplexen Prozesses zu neuen Muskelfasern (1, 4). Ebenso wird die Extrazellulärmatrix (EZM) umgebaut und neu organisiert, wobei verschiedene Moleküle und Proteasen der EZM für Stabilität sorgen und zudem eine Umgebung schaffen, die die zelluläre Regeneration fördert (1, 4). Die dabei veränderte EZM und die freigesetzten Wachstumsfaktoren unterstützen im Rahmen der Angiogenese das Einsprossen neuer Blutgefäße in das sich regenerierende Gewebe, um eine ausreichende Sauerstoffversorgung sicherzustellen (4). Zusätzlich kommt es zur Reinnervation im verletzten Gebiet (4).

Die **Remodulationsphase** (ab Tag 21) ist gekennzeichnet durch einen Umbau und eine Wiederherstellung der funktionellen Kapazität der Muskulatur (1, 4). Die neu gebildeten Muskelfasern reifen aus, gewinnen an Größe und Kraft und integrieren das neu gebildete Gewebe mit intaktem Muskel- und Sehngewebe (1). Zudem wird das Narbengewebe reorganisiert und die EZM fortlaufend an die spezifischen Anforderungen angepasst (4). Im Idealfall führt dies zu einer vollständigen Regeneration des Muskelgewebes und seiner Funktion (1, 4).

1.2 Muskelverletzungen im Fußball

Ein wesentliches Problem bei der Erhebung von Verletzungsdaten liegt einerseits in der häufig ungleichen Methodik der Datenerfassung und -aufzeichnung und andererseits in den unterschiedlichen Definitionen von Verletzungen (20, 46). Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit der Union der Associations Européennes de Football (UEFA) und Vertreter*innen führender Fußballforschungsgruppen 2005 ein Konsens über die Methodik und den Aufbau von Studien verfasst (32).

1.2.1 Definition „Verletzung“ und „Verletzungsschwere“

Eine Verletzung liegt vor, wenn Spieler*innen aufgrund einer Verletzung nicht vollständig an einer Trainingseinheit oder an einem Spiel teilnehmen können. Die Kategorisierung der Verletzungsschwere erfolgt anhand der Zahl der Tage, an denen eine vollständige Teilnahme an Trainingseinheiten oder Spielen nicht möglich war. Dem UEFA-Konsensus zufolge werden Verletzungen vom Datum der Verletzung bis zum Datum der vollständigen Wiedereingliederung ins Mannschaftstraining gezählt. Eine Verletzung kann demnach in

„minimal“ (1–3 Tage), „leicht“ (4–7 Tage), „mittel“ (8–28 Tage) und „schwer“ (>28 Tage) eingeteilt werden. (32)

1.2.2 Epidemiologie von Muskelverletzungen

Muskelverletzungen machen ein Drittel aller Verletzungen im Fußball aus und betreffen in 92 % der Fälle die untere Extremität (7). Mehr als die Hälfte davon sind Oberschenkelverletzungen, wobei 2/3 der Fälle davon die Hamstrings und 1/3 die Quadrizepsmuskulatur betreffen (6). Die Hüft-Leisten-Region ist mit 23 % und die Wade mit 13 % ebenso häufige Verletzungslokalisationen (5). In einer männlichen Profifußballmannschaft treten pro Saison durchschnittlich 15 bis 18 muskuläre Verletzungen auf (7).

Abhängig von der Art und Schwere der Verletzung, variiert dabei die Ausfallszeit erheblich. Bei über 50% der Verletzungen beträgt die Ausfallszeit 1- 28 Tage, während sie bei 13% der Fälle über 28 Tage hinausgeht. Zudem ist im Spiel das Verletzungsrisiko sechsmal höher als im Training und steigt dabei über die Dauer der Belastung an. (5)

1.2.3 Klassifikation von Muskelverletzungen

Eine Vielzahl unterschiedlicher Klassifikationssysteme existiert, von denen einige allgemein und andere spezifisch sind (8). Ein gutes Klassifikationssystem sollte dabei praktikabel und reproduzierbar sein und eine stadienabhängige Prognose im Zusammenhang mit der Verletzungsdauer zulassen (8).

Diese Arbeit wird aus der Vielzahl von Klassifikationssysteme, die „Munich Consensus Classification“, „British Athletic Muscle Injury Classification“ und das „MLG-R System“ nach Barcelona untersuchen, die insbesondere in der MRT-Diagnostik Anwendung finden. Im folgenden Abschnitt werden diese Systeme mit besonderem Augenmerk auf ihre MRT-basierte Diagnostik vorgestellt und abschließend eine Stärken-Schwächen Analyse durchgeführt.

Munich Consensus Classification

Das Münchner Klassifikationssystem wurde 2011 im Rahmen eines Expertenmeetings entwickelt und ist gegenwärtig das am häufigsten verwendete Klassifikations- und Bewertungssystem für Muskelverletzungen im deutschsprachigen Raum (1, 9). Es wird zwischen direkten Muskelverletzungen (Kontusion und Laceration) und indirekten Muskelverletzungen unterschieden (8). Indirekte Muskelverletzungen werden weiter in funktionelle und strukturelle Verletzungen unterteilt, die wiederum in verschiedene Subtypen untergliedert werden (8).

Funktionelle Muskelverletzungen zeigen makroskopisch keine strukturelle Läsion und lassen sich in überlastungsbedingte und neuromuskuläre Muskelläsionen kategorisieren.

Überlastungsbedingte Muskelläsionen (Typ 1) unterteilen sich in Typ 1A und Typ 1B-Läsionen: Typ 1A beschreibt schmerzhafte Muskelverhärtungen, die durch muskuläre Ermüdung entstehen, vergleichbar mit einem Krampf oder Tonuserhöhung, jedoch ohne morphologisch nachweisbare Veränderungen. Im MRT erscheinen diese Läsionen in der Regel unauffällig, ohne erkennbares Ödem. Typ 1B entspricht dem klassischen Muskelkater (DOMS – Delayed Onset Muscle Soreness), der sich in der MRT durch generalisierte, fleckige Signalveränderungen einzelner oder mehrerer Muskelgruppen bemerkbar machen kann. Je nach zugrundeliegender Ursache können Neuromuskuläre Muskelläsionen in Typ 2A- und Typ 2B-Läsionen unterteilt werden. Bei Typ 2A kommt es aufgrund einer funktionellen Störung der Wirbelsäule und Reizung spinaler Nervenwurzeln, meist lumbal, zu einer reflektorischen Muskelverhärtung in der Zielmuskulatur. Eine Typ-2B-Läsion entspricht der klassischen Muskelzerrung, bei der es aufgrund einer Störung an der neuromuskulären Endplatte zu einer Tonuserhöhung der Muskulatur kommt. Die MRT zeigt für beide Subtypen ein unauffälliges Bild oder isolierte, umschriebene Ödemzonen innerhalb oder außerhalb des betroffenen Muskels. (30)

Strukturelle Muskelverletzungen können je nach Ausmaß des Gewebes Schadens in partielle oder komplette Muskelverletzungen eingeteilt werden. Partielle Muskelrisse (Typ 3) werden in 3A- und 3B-Läsionen differenziert. Typ 3A-Läsionen beschreibt eine Ruptur einzelner Muskelfasern oder eines Primärbündels mit lokalisierter Faserunterbrechung, die gelegentlich von leichter intramuskulärer Flüssigkeitsansammlung oder Hämorrhagie

begleitet wird. Typ 3B-Läsionen (Muskelbündelriss, interfaszikuläre Läsion) bezeichnen die Ruptur eines oder mehrerer Sekundärbündel mit einer signifikanten Faserunterbrechung von mehr als 5 mm. Verletzungen dieser Art weisen häufig eine Retraktion der Muskelbündel bzw. der Sehne, Faszienbeteiligung und eine ausgeprägter intermuskulärer Hämatombildung auf. Typ 4-Läsionen beschreiben vollständige oder komplette Unterbrechung der Muskel- oder Sehnenkontinuität. Eine wellenförmige Sehnenstruktur, abhängig von der Retraktion, ausgeprägte intermuskuläre Hämatombildung und Fasziënläsion sind häufig nachweisbar.

(30)

Tabelle 1: München-Klassifikation in Anlehnung an (1)

München-Klassifikation			
Indirekte Muskelverletzung			
Typ	Klassifikation	MRT/US	
Funktionell	1A	Ermüdungsbedingte schmerzhafte Muskelverhärtung	Negativ
	1B	Muskelkater (DOMS)	
	2A	Neuromuskuläre Muskelläsion (rückenbedingt)	Negativ oder nur Ödem
	2B	Neuromuskuläre Muskelläsion (muskulär)	
Strukturell	3A	Muskelfaserriss (intrafaszikuläre Läsion)	Faserunterbrechung (<5mm) in hochaufgelöster MRT; intramuskuläres Hämatom
	3B	Muskelbündelriss (interfaszikuläre Läsion)	Deutliche Faserunterbrechung (>5mm), evtl. Retraktion, Faszienerletzung und intermuskuläres Hämatom
	4	(Sub-) totaler Muskelriss bzw. sehnige Avulsion	(Sub-)totale Kontinuitätsunterbrechung von Muskel/Sehne; evtl. wellenförmige Sehne und Retraktion; mit Faszienerletzung und intermuskuläres Hämatom
Direkte Muskelverletzung			
	Kontusion	MRT/US: Hämatom in diffuser oder lokalisierter Ausdehnung; Volumenzunahme und/oder Verdrängung der Muskulatur durch Einblutung	
	Lazeration	-	

British Athletics Muscle Injury Classification (BAMIC)

Dieses MRT-basierte Klassifikationssystem wurde von Vertreter*innen des britischen Leichtathletikverbandes für indirekte Muskelverletzungen entwickelt (8, 28). Das System wird häufig bei Verletzungen der ischiocruralen Muskulatur eingesetzt, ist jedoch auch auf andere Muskelgruppen anwendbar (8, 28). Um eine adäquate Return-to-Play-(RTP)-Prognose zu stellen, wird dabei sowohl das Ausmaß als auch die Lokalisation der Verletzung beurteilt (28).

Grad 0-Läsionen beschreiben Befunde ohne strukturellen Schaden und werden daher nicht dargestellt und gelten als MRT-negativ (8). Sie können weiters in fokale neuromuskuläre Läsionen mit normalem MRT (0a) und MRT-Befunden, welche dem eines Muskelkaters (DOMS) (0b) entsprechen, unterteilt werden (28). Wenn der Verdacht einer neuronalen Komponente besteht, kann zusätzlich die Bezeichnung „N“ angeführt werden (9).

Strukturelle Läsionen werden den Graden 1 bis 4 zugeordnet und primär in fettunterdrückten Sequenzen, wie zum Beispiel STIR, anhand von der Signalanhebung klassifiziert. Grad 1-Läsionen zeigen strukturelle Veränderungen mit einer Faserunterbrechung von <1 cm, bei denen die Signalanhebung auf <10 % der Muskelquerschnittsfläche und eine longitudinale Ausdehnung von <5 cm begrenzt sind. Grad 2-Läsionen beschreiben moderate Muskelverletzungen mit einer Faserunterbrechung von <5 cm. Die Signalanhebung umfasst 10–50 % der Muskelquerschnittsfläche oder 5–15 cm in der Längsausdehnung. Grad 3-Läsionen sind ausgedehnte Muskelverletzungen mit einer Faserunterbrechung von >5 cm. Die Signalanhebung betrifft über 50 % der Muskelquerschnittsfläche oder eine Längsausdehnung von mehr als 15 cm.

Grad 4-Läsionen sind komplette Muskel- bzw. Sehnenabriss (c), die durch eine vollständige Diskontinuität der Muskel- bzw. Sehnenfasern erkennbar sind. (26)

Zusätzlich wird den Graden 1–4 je nach topografischer Verletzungslokalisierung ein Suffix zugeordnet. Das Suffix „a“ steht für myofasziale Läsionen mit erhöhter Signalanhebung im peripheren Bereich des Muskels und entlang der Faszie. Das Suffix „b“ beschreibt muskulotendinöse Läsionen im Muskelbauch oder am muskulotendinösen Übergang (MTJ). Das Suffix „c“ kennzeichnet intratendinöse Läsionen, die bis in das Innere des Sehngewebes reichen. Eine Grad-1c-Läsion wird in der klinischen Praxis nicht verwendet,

da eine Beteiligung der Sehne als prognostisch ungünstig gilt und dementsprechend höhergradig klassifiziert wird. Grad 2c-Läsionen beschreiben intratendinöse Verletzungen mit einer longitudinalen Ausdehnung von <5 cm bzw. <50 % der Sehnenquerschnittsfläche. Grad 3c-Läsionen wiederum überschreiten mindestens eine dieser Kategorien. (28)

Tabelle 2: BAMIC in Anlehnung an (28)

BAMIC		
Grade	Description	MRI
0a	Focal area of muscle pain usually following exercise	Normal
0b	Generalised muscle pain following unaccustomed exercise	Normal or patchy high signal change throughout one or more muscles
1a	Small Myofascial tear	High signal change at the fascia border with < 10% extension into the muscle belly < 5 cm Cranio-caudal distance (CC)
1b	Small MTJ Tear	High signal change < 10% of the CSA of muscle at the MTJ High signal change < 5 cm Cranio-caudal length (CC) Fibre interruption < 1 cm
2a	Moderate Myofascial tear	High signal change evident at fascial border with extension into the muscle High signal change CSA between 10–50% at the maximum point High signal change of CC length 5–15 cm Fibre disruption < 5 cm.
2b	Moderate MTJ Tear	High signal change evident at the MTJ High signal change CSA between 10–50% at the maximum point High signal change of CC length 5–15 cm; fibre disruption < 5 cm Fibre disruption < 5 cm
2c	Moderate Intra-Tendinous Tear	High signal change extends into the tendon Longitudinal length of tendon involvement < 5 cm CSA of tendon involvement < 50% of maximum tendon CSA No loss of tension or discontinuity within the tendon
3a	Moderate Myofascial Tear	High signal change evident at fascial border with extension into the muscle High signal change CSA > 50 % at the maximum point High signal change of CC length >15 cm Fibre disruption > 5 cm
3b	Extensive MTJ Tear	High signal change evident at the MTJ High signal change CSA > 50% at the maximum point High signal change of CC length >15 cm Fibre disruption > 5 cm
3c	Extensive Intra-Tendinous Tear	High signal change extends into the tendon Longitudinal length of tendon involvement > 5 cm CSA of tendon involvement > 50% of maximum tendon CSA May be loss of tension but no discontinuity is evident
4	Full thickness tear of muscle	Complete discontinuity of muscle with retraction
4c	Full thickness tear of tendon	Complete discontinuity of tendon with retraction

MLG-R Classification System (Barcelona)

Die medizinische Abteilung des FC Barcelona hat in Zusammenarbeit mit international anerkannten Expert*innen und Institutionen eine konsensbasierte Facettenklassifikation für Muskelverletzungen vorgeschlagen (29).

Mechanismus (M): Zunächst wird abhängig vom Verletzungsmechanismus zwischen direkten (z. B. Schlag) und indirekten (z. B. exzentrische Muskelaktivität oder schnelle Dehnung) Verletzungen unterschieden. MRT-negative Fälle werden als funktionelle Beschwerden eingestuft und zeigen keine strukturellen Veränderungen. Abgekürzt werden sie mit „D“ für direkt, „I“ für indirekt und „N“ für MRT-negativ. Optional erfolgt bei indirekten Muskelverletzungen noch die Zuteilung in Stretching-Typ (s) und Sprinting-Typ (p). (29)

Lokalisation (L): Die Verletzungslokalisierung bezieht sich auf die anatomische Lokalisation der Läsion innerhalb des Muskels und wird grob in proximal (P), mittel (M) und distal (D) eingeteilt. Zur weiteren Differenzierung können noch die Subindizes (p) und (d) angegeben werden, welche die proximalen und distalen muskulotendinösen Übergänge beschreiben. (29)

Schweregrad (G): Die Schwere einer Verletzung wird durch spezifische Merkmale wie das Ausmaß des Ödems, das Vorhandensein von intra- oder intermuskulären Blutungen und den betroffenen Querschnittsbereich (Cross-Sectional Area, % CSA) beschrieben. Die Einteilung erfolgt anhand dieser Merkmale in 4 Schweregrade. Grad-0-Läsionen beschreiben eine unauffällige MRT-Bildgebung ohne Ödem und ohne Hinweis auf strukturelle Schäden. Grad 1-Läsionen sind durch hyperintense Signalveränderungen im Muskel- oder peritendinösen Gewebe ohne relevante Strukturunterbrechung der Muskelfasern charakterisiert. Grad-2-Läsionen zeigen ebenfalls hyperintense Signalveränderungen mit diskreter architektonischer Verzerrung der Faserstruktur und geringgradig begleitender Hämorrhagie. Eine abgrenzbare Faserunterbrechung ist nicht erkennbar und das Ödemmuster gleicht jenem von Grad 1. Eine Grad 3-Läsion liegt vor, wenn eine klar quantifizierbare Faserunterbrechung in kranio-kaudaler oder axialer

Ausdehnung vorliegt. Dies weist auf eine schwerwiegende Muskel-Sehnenverletzung hin. (29)

Die Größe der Faserunterbrechung im am stärksten betroffenen Muskelbereich kann zusätzlich in der axialen Ebene quantifiziert werden. Der prozentuale Anteil der entsprechenden Querschnittsfläche (% CSA) sollte als numerischer Subindex dem Schweregrad zugeordnet werden. Sofern eine intratendinöse Verletzung, eine Läsion am muskulotendinösen Übergang (MTJ) oder intramuskuläre Sehne mit Nachweis einer Diskontinuität oder Retraktion vorliegt, wird der Schweregrad durch ein hochgestelltes 'r' ergänzt. (29)

Re-Verletzungen (R) werden, je nachdem, ob es sich um eine Erstverletzung oder ein Rezidiv handelt, mit „R0“ (Erstverletzung), „R1“ (erstes Rezidiv) und „R2“ (zweites Rezidiv) usw. klassifiziert (29).

Tabelle 3: MLG-R Klassifikation in Anlehnung an (44)

MLG-R			
Mechanism (M)	Location (L)	Grading (G)	Reinjury (R)
T (Direct)	P Injury located in the proximal third of the muscle belly M Injury located in the middle third of the muscle belly D Injury located in the distal third of the muscle belly		
I (Indirect) + Subindex: s = stretching type p = sprinting type	In case of Indirect Injury and MTJ injured: p proximal MTJ injured d distal MTJ injured	0-3	0: 1st episode 1: 1st re-injury 2: 2nd re-injury
Negative MRI injuries (location is pain related) N + Subindex: s = stretching type p = sprinting type	N p Proximal third injury N m Middle third injury N d Distal third injury		
Grading of injury severity			
0	Clinical suspicion but negative MRI Second letter indicates location of pain		
1	Edema only: interstitial, feathery hyperintensity on FSPD or T2 FSE + STIR No hemorrhage, no architectural distortion; fiber alignment and pennation angle preserved		
2	Edema + minor architectural distortion: fiber blurring and/or altered pennation angle. ± minor intermuscular hemorrhage No measurable fiber gap		
3	Partial Structural tear with quantifiable gap (craniocaudal or axial) Focal defect with partial fiber retraction ± intermuscular hemorrhage Fiber gap at maximal site (axial plane) and CSA (%) should be documented		
r	Superscript (r) when injury involves intramuscular tendon or MTJ, showing disruption/retraction or loss of tension		

Stärken und Schwächen der Klassifikationssysteme

Das Munich Klassifikationssystem nach Müller-Wohlfahrt et al. stellt eine präzise Terminologie zur Beschreibung von Muskelverletzungen bereit. Es unterscheidet zwischen funktionellen und strukturellen Muskelverletzungen und ermöglicht somit eine präzise Unterteilung in prognostisch relevante Gruppen. Ein zusätzlicher Vorteil liegt in der

Differenzierung zwischen direkten und indirekten Muskelverletzungen, die in der klinischen Praxis unterschiedlicher Behandlungen bedürfen und daher von erheblicher Bedeutung sind. Obwohl das System über diese Vorteile verfügt, weist es mehrere Einschränkungen auf. Funktionelle Muskelverletzungen werden zwar berücksichtigt, erlangen jedoch bisher aufgrund mangelnder wissenschaftlicher Evidenz keine umfassende Akzeptanz. Zusätzlich werden prognostisch relevante MRT-Befunde, wie die Länge des Faserrisses, die Beteiligung spezieller Gewebearten und die Verletzungslokalisation, in der Klassifikation vernachlässigt. Eine präzise Quantifizierung für kleine und moderate partielle Risse ist demnach nicht möglich, was eine präzise Einschätzung der Prognose erschwert. Darüber hinaus lässt der Konsens nicht die Möglichkeit zu, dass fokale Muskelläsionen unterhalb des MRT-Auflösungsvermögens existieren könnten. (9, 30)

Die BAMIC bietet ein klares diagnostisches Rahmenwerk und basiert primär und detailliert auf MRT-Merkmalen. Die quantitative Erfassung der Läsionsausdehnung (in Zentimetern und Prozent) und Bestimmung prognostisch relevanter Gewebetypen ermöglicht eine präzise Diagnosestellung, die für die Prognoseabschätzung und das therapeutische Management von großer Bedeutung sind. Eine potenzielle Limitation liegt in der unzureichenden Integration klinischer Daten und in der möglichen Überschneidung zwischen den verschiedenen Schweregraden, welche sich durch das neunstufige Bewertungssystem und seinen Subkategorien ergibt. Das Klassifikationssystem wurde speziell für die Beurteilung indirekter Muskelverletzungen, insbesondere der ischiokruralen Muskulatur, entwickelt. Kontusionsverletzungen bleiben unberücksichtigt, wodurch die umfassende klinische Anwendbarkeit des Systems limitiert wird. (28)

Das MLG-R-System verfolgt einen praxisorientierten Ansatz und integriert dabei sowohl klinische als auch bildgebende Merkmale. Ähnlich wie das Münchener System unterscheidet es zwischen direkten und indirekten Muskelverletzungen und berücksichtigt somit die klinische Relevanz der jeweiligen Verletzungsmechanismen, was für die Behandlungsstrategie und weiteren Rehabilitationsverlauf von großer Bedeutung ist. Als bedeutsamer Faktor für die Prognose berücksichtigt sie auch Rezidivverletzungen, wovon sie sich von den anderen Klassifikationen abhebt. Zur Abgrenzung der Schweregrade wurde jedoch kein objektiver Grenzwert definiert. Unabhängig vom Ausmaß der Verletzung bzw. Querschnittsbeteiligung erfolgt die pauschale Zuordnung aller Läsionen mit erkennbarer

Faserlücke zum Grad 3, was die prognostische Differenzierung erheblich einschränkt. Zusätzlich ist das System nur für Verletzungen des M. rectus und der ischiokruralen Muskulatur evaluiert worden. Ob die Klassifikation auch auf andere Muskelgruppen übertragbar ist, bedarf weiterer Forschung. (29)

1.3 Magnetresonanztomographie der Skelettmuskulatur

Die Magnetresonanztomografie (MRT) gilt weiterhin als Goldstandard in der Diagnostik von Muskelverletzungen, insbesondere im Leistungssport (11, 12, 13, 14, 15). Durch die hohe räumliche und kontrastreiche Auflösung ermöglicht sie die präzise Lokalisation und Graduierung einer Läsion (14, 16). Aufgrund der fehlenden Strahlenexposition ist sie auch eine geeignete Untersuchungsmethode für jüngere Patient*innen und Kindern und kann daher bedenkenlos im Rahmen von Kontrolluntersuchungen eingesetzt werden (1).

1.3.1 Physikalische Grundlagen der MRT

Das Prinzip der MRT basiert auf der physikalischen Eigenschaft, dass Atomkerne mit ungerader Kernzahl (Protonen und Elektronen) aufgrund ihres magnetischen Moments in einem äußeren Magnetfeld ausgerichtet werden (10). Im menschlichen Körper spielt das Molekül Wasserstoff (H^+) hierbei eine entscheidende Rolle (10).

Jedes Proton eines Wasserstoffatoms verfügt über einen Eigendrehimpuls (Kernspin), der aufgrund der positiven Ladung mit einer stoffspezifischen Geschwindigkeit um die eigene Achse rotiert und dabei ein eigenes Magnetfeld induziert (10). Diese Magnetfelder liegen im menschlichen Körper ungeordnet vor und kompensieren einander (10). In modernen Magnetresonanztomografen, die das bis zu 15.000- bis 30.000-fache des Erdmagnetfeldes erreichen, richten sich die Spinalachsen der Wasserstoffatome parallel oder antiparallel zu den magnetischen Feldlinien aus (1, 10). Die Mehrzahl der Protonen nimmt die energetisch günstigere parallele Ausrichtung ein (10). Die dadurch entstehende messbare Magnetisierung, die in Richtung des Magnetfeldes zeigt, wird Längsmagnetisierung (M_z) genannt (10).

Ein ebenso bedeutsamer Vorgang, der hierbei eine Rolle spielt, ist die sogenannte Präzession (10). Dabei bewegen sich Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl in einem starken Magnetfeld mit einer kreiselähnlichen Rotationsbewegung um die Längsachse des

Magnetfeldes (10). Das starke äußere Magnetfeld induziert bei den Kernen eine charakteristische Rotationsfrequenz, die als Präzessions- oder Larmorfrequenz bezeichnet wird und sich aus einer materialspezifischen Konstante sowie der Stärke des angelegten Magnetfeldes ergibt (10).

Die Anwendung eines spezifischen Hochfrequenzimpulses führt unter Energieaufnahme zu einer Änderung der Spin-Ausrichtung, was wiederum eine Änderung der Protonenbewegung bewirkt (1). Dieses als Resonanz bezeichnete Phänomen resultiert in einer Modifikation der Präzessionsbewegungen der Protonen und beeinflusst die magnetische Kopplung angrenzender Wasserstoffatome. (1)

Der Hochfrequenzimpuls induziert einen Resonanzzustand der Protonen, wodurch eine Synchronisation der Spins auf identischer Larmorfrequenz erreicht wird (10). Dies hat eine Quermagnetisierung zur Folge, da ein Teil der Protonen in den antiparallelen Zustand übergeht und demnach von der Längsmagnetisierung abweicht (10). Nach Abschaltung des Hochfrequenzimpulses kehren die Protonen wieder in ihren parallelen Ausgangszustand zurück, was als Relaxation bezeichnet wird (10). Die während der Relaxation freigesetzte Energie kann durch ein entsprechendes Detektionssystem, in Form einer Spule, detektiert werden (1, 10).

Die Relaxation lässt sich weiters in eine Längs- und Querrelaxation unterteilen (10). Während in der Längsrelaxation die Protonen nach Anregung wieder ihren ursprünglichen Ausgangszustand entlang des Magnetfeldes einnehmen und Energie abgeben, kommt es bei der Querrelaxation zur Desynchronisation der Protonenbewegungen ohne Energieabgabe (10). Die Längsrelaxation wird durch die Zeitkonstante T_1 beschrieben und gibt an, wie lange es dauert, bis 63 % der Protonen wieder ihren Ausgangszustand erreicht haben. Die Querrelaxation wird durch die Zeitkonstante T_2 beschrieben und gibt an, wie schnell die Protonen ihre synchronisierte Bewegung verlieren (10).

Während der Längsrelaxation geht von den Protonen ein schwaches magnetisches Signal aus. Aus diesem Grund werden die Protonen mehrmals durch Hochfrequenzimpulse angeregt. Die dabei gemessenen Signale werden einer elektronischen Mittelung (Averaging) unterzogen und wird zur Rausch-Elimination genutzt. Eine Abfolge mehrerer HF-Impulse

wird Pulssequenz genannt. Die Zeitspanne zwischen zwei Anregungen wird Repetitionszeit (TR) genannt, während die Zeitspanne zwischen Anregung und Signalaufnahme die Echozeit (TE) darstellt. (1,10)

Um das abgestrahlte Signal im menschlichen Körper dem Entstehungsort zuordnen zu können, werden zusätzliche magnetische Felder eingesetzt (1). Sogenannte Gradientenfelder werden dem statischen Magnetfeld überlagert und machen es möglich, Schichten oder Volumina selektiv anzuregen und zu rekonstruieren (1). Die Signalintensität wird durch verschiedene Gewebeparameter, einschließlich Protonendichte sowie T1- und T2-Relaxationszeiten beeinflusst (10). Zusätzlich haben unterschiedliche Sequenzen und Bildgebungsparameter einen erheblichen Einfluss auf das Signalverhalten (10).

1.3.2 MRT- Untersuchungstechniken: Normalbefund und Pathologie

Das Erscheinungsbild der Muskulatur in der MRT wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, darunter die gewählte Sequenz sowie das Vorliegen von Verletzungen und ihren pathologischen Veränderungen (14, 15, 17). Die gesunde Muskulatur ist durch eine weitestgehend homogene Signalintensität charakterisiert, und einzelne Muskelfasern sind nicht eindeutig abgrenzbar (1). Zu den routinemäßig eingesetzten Techniken bei Muskelverletzungen im MRT zählen die flüssigkeitssensitiven Sequenzen mit Fettunterdrückung und die T1-gewichteten Sequenzen (13).

Erstere erlauben die Darstellung von ödematösen Veränderungen im Bereich der myotendinösen und myofaszialen Einheit und ermöglichen die genaue Abgrenzung von epi- bzw. perifaszialen Flüssigkeitsansammlungen und Hämatomen. (13) Zu den flüssigkeitssensitiven Sequenzen zählen die fettunterdrückte T2-gewichtete Sequenz (FS T2w), die fettunterdrückte Protonendichte-gewichtete Sequenz (FS PDw), die fettunterdrückte intermediärgewichtete Sequenz (FS lw) und die Short-Tau-Inversion-Recovery-Technik (STIR). (13) Dabei lassen besonders T2-gewichtete Aufnahmen wasseräquivalente Strukturen als stark hyperintens und somit hell erscheinen (1). Fettgewebe erscheint als dunkel bis mittelhell (1). In protonengewichteten Aufnahmen erscheint Flüssigkeit dunkler als in den T2-gewichteten Aufnahmen, wobei die Detailauflösung jedoch besser ist (1).

T1-gewichtete Sequenzen (T1w) weisen eine geringere Sensitivität für die Detektion von ödematösen Veränderungen im Muskel bei akuten Läsionen auf (13). Sie sind jedoch gut geeignet für die Beurteilung von subakuten Blutungen und Hämatomen. Des Weiteren liefern sie wertvolle Informationen über das Narbengewebe bei chronischen Verletzungen und helfen bei der Bewertung von Atrophie und fettiger Infiltration (13).

In der täglichen Praxis ist die Abgrenzung zwischen Ödem und Blutung, insbesondere bei der Prognoseabschätzung, von großer Relevanz und stellt vor allem zu Beginn einer Verletzung eine komplexe Aufgabe dar (14, 15). Dabei spielen die magnetischen Eigenschaften der Blutbestandteile in den einzelnen Phasen der Verletzung und ihre Signalintensitäten in den unterschiedlichen MRT-Sequenzen eine besondere Rolle (14, 15). Sofern es zu einem nachweisbaren strukturellen Schaden der Muskulatur kommt, sind die Sekundärbündel durch Blut und Ödem abgrenzbar und lassen sich hinsichtlich des Ausmaßes der Ruptur sicher beurteilen (1).

In T1-gewichteten Aufnahmen erscheint frisches Blut, das Desoxyhämoglobin enthält und in den ersten Stunden aus Oxyhämoglobin gebildet wird, hypointens (14, 15, 19). In der subakuten Phase, 1–2 Tage nach Verletzung, kommt es zur Umwandlung in Methämoglobin, was dazu führt, dass Blut in T1-gewichteten Aufnahmen hyperintens erscheint (14, 15). Da Ödeme größtenteils aus Wasser bestehen, erscheinen sie in der Regel immer hypointens (14).

In T2-gewichteten Aufnahmen zeigen frische Blutungen ebenfalls eine niedrige Signalintensität. Subakute und chronische Blutungen, bei denen Methämoglobin extrazellulär vorliegt, erscheinen hyperintens. Auch Ödeme erscheinen aufgrund des Wassergehalts in T2-gewichteten Sequenzen hyperintens. Protonengewichtete Aufnahmen ähneln der Signalgebung von Ödemen und Blutungen in T2-gewichteten Sequenzen, weisen jedoch einen geringeren Kontrast auf. (14, 15)

Stages of hematoma			T1	T2
Hyperacute	< 24hrs		Gray	White
Acute	1-3 days		Dark Gray	Black
Early Subacute	> 3 days		White	Black
Late subacute	> 7 days		White	White
Chronic	> 14 days		Black	Black

Abbildung 4: Entwicklungsstadien eines Hämatoms in T1 und T2 (22)

1.3.3 MRT- Protokoll

Eine entscheidende Rolle in der Diagnostik von Muskelverletzungen spielt die Auswahl eines geeigneten MRT-Protokolls. Sowohl die anatomische Region als auch die Größe des Muskels und die Ausdehnung einer Verletzung müssen berücksichtigt werden. Durch ein kleines Field of View (FOV) und dünne Schichten (z. B. < 4 mm) ist eine exakte und differenzierte Darstellung möglich. (12, 23)

Flüssigkeitssensitive Sequenzen mit Fettunterdrückung (TSE T2-gewichtet oder PD-gewichtet) mit mittlerer Echozeit (TE) (z. B. < 65 ms) stellen den Hauptpfeiler der Diagnostik dar, da sie Flüssigkeiten sensitiv darstellen können und einen adäquaten Kontrast liefern. Anatomische Sequenzen (T1-gewichtet) werden hauptsächlich zur Detektion von Blutansammlungen und Narbengewebe genutzt und ermöglichen eine differenzierte Darstellung der Muskelarchitektur. (14, 12)

Zur Sicherstellung einer optimalen Signalintensität und hohen räumlichen Auflösung sollten die Untersuchung mit Hochfeld-MRT-Systemen (1,5 oder 3,0 Tesla) und fortschrittlicher Spurentechnologie durchgeführt werden. Die multiplanare Darstellung in axialen, sagittalen und koronaren Ebenen, einschließlich schräger Schnitte bei tiefliegenden Muskeln, ist entscheidend für die optimale Darstellung des Verletzungsausmaßes. (23, 28)

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Zeitpunkt der Durchführung der MRT-Diagnostik. In der Literatur besteht bislang kein Konsens hinsichtlich des optimalen Zeitpunkts für die

Durchführung der Bildgebung: jedoch bevorzugt die Mehrheit der Expert*innen einen Zeitraum von 24-48 Stunden nach dem Verletzungsereignis, da die Ödem-Reaktion nach etwa 24 Stunden ihr Maximum erreicht hat. (18, 24, 25)

In der Regel erfolgt die Untersuchung in Rückenlage, wobei zu beachten ist, dass Ursprung und Ansatz des jeweiligen Muskels abgebildet sind, um alle Begleitreaktionen darzustellen. Ein Hautmarker (z. B. Vitamin E Kapsel, Lebertran Kapsel) kann an der Stelle des stärksten Schmerzes angebracht werden, um das Auffinden der gesuchten Läsion zu erleichtern und etwaige Nebenbefunde zu selektieren. (12, 28)

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign und Zielsetzung

Die vorliegende Untersuchung wurde als retrospektive, monozentrische Beobachtungsstudie konzipiert. Ziel der Studie war es, die Wertigkeit der MRT-Diagnostik von Muskelverletzungen bei männlichen Profifußballern zu untersuchen und ihren prognostischen Wert zur Beurteilung der Rekonvaleszenz anhand etablierter Klassifikationssysteme zu bestimmen. Die MRT-Aufnahmen wurden dabei von einem habilitierten Facharzt für Radiologie mit ausgewiesener Erfahrung in der muskuloskelettalen Bildgebung sowie einem Facharzt für Radiologie ohne spezielle muskuloskelettale Schwerpunktqualifikation unabhängig voneinander beurteilt. Zur Bewertung und Klassifikation der Läsionen lagen den beiden Untersuchern zu keinem Zeitpunkt klinische Informationen vor, sondern erfolgten ausschließlich auf Basis der vorliegenden Bildgebung. Die klinischen Daten wurden im Vorfeld erhoben und pseudonymisiert verarbeitet.

Die Datenerhebung und Bildgebung erfolgte im Unfallkrankenhaus Steiermark – Standort Graz bzw. LKH Graz II – Standort West und umfasste einen Zeitraum vom 1. Juni 2014 bis 1. Jänner 2022.

2.2 Studienkollektiv

Die Grundlage der bildgebenden und statistischen Analyse bildeten 79 dokumentierte Muskelverletzungen von insgesamt 51 männlichen Fußballern einer österreichischen Bundesliga Mannschaft.

Einschlusskriterien:

- Vorliegen einer MRT-Untersuchung zur jeweiligen Muskelverletzung
- Zugehörigkeit des Spielers zum Profikader der Mannschaft im Studienzeitraum

Ausschlusskriterien:

- Fehlen der MRT-Bildgebung zur jeweiligen Muskelverletzung
- Isolierte Sehnenverletzung ohne muskuläre Beteiligung

2.3 Bildgebung und Untersuchungstechniken

Die MRT-Untersuchung wurde mit einem 1,5 Tesla MRT-Gerät der Marke Siemens vom Modell MAGNETOM (Erlangen, Deutschland) unter Anwendung eines standardisierten Protokolls mit axialen, koronaren und sagittalen Sequenzen durchgeführt. Zum Einsatz kamen T1-gewichtete (T1w TSE) sowie flüssigkeitssensitive Sequenzen (PDw TSE FS, STIR oder T2 TSE FS). Um eine adäquate räumliche Auflösung auch kleiner Läsionen zu gewährleisten, betrug die Schichtdicke 4 mm. Die Klassifikation der Läsionen erfolgte entsprechend der Munich Consensus Classification, der British Athletics Muscle Injury Classification sowie der MLG-R Klassifikation des FC Barcelona.

2.4 Datenerhebung

Die klinischen Parameter wurden retrospektiv aus den elektronisch gespeicherten Krankenakten der Patienten des Unfallkrankenhauses Steiermark – Standort Graz (UKH) extrahiert und durch sportsspezifische Informationen der Plattform www.transfermarkt.at ergänzt. Die radiologischen Parameter wurden vor Beginn der Studie von den beiden Radiologen definiert, im Rahmen der MRT-Analyse systematisch erhoben und den jeweiligen Klassifikationssystemen zugeordnet.

Klinische Parameter: Erhobene Patientendaten

Folgende klinische Parameter wurden für die Analyse der Verletzungen dokumentiert:

- Alter des Spielers zum Zeitpunkt der Verletzung
- Datum der Verletzung
- Datum der MRT-Untersuchung
- Position des Spielers
- Bevorzugtes Spielbein
- Spielminuten pro Saison
- Gesamtanzahl an Verletzungen
- Zeitpunkt der Verletzung (Meisterschaft oder Vorbereitung)
- Anzahl verpasster Pflichtspiele aufgrund der Verletzung
- Ausfallszeit (in Tagen)
- Betroffene Körperseite

- Verletzungsumstände (Training vs. Match)
- Bewerb, in dem die Verletzung auftrat

Radiologische Parameter: MRT-Analyse

Folgende radiologischen Parameter wurden für die Analyse erfasst:

- Betroffene Muskelgruppe bzw. Muskel
- Lokalisation der Verletzung (proximal, mittel, distal)
- Beteiligung myotendinöser oder subfaszialer Strukturen
- Sehnen- oder Sehnenplattenbeteiligung
- Läsionsausdehnung (longitudinal, transversal, sagittal)
- Vorhandensein und Ausmaß von Hämatomen und epifaszialem Ödem
- Klassifikation gemäß Munich, BAMIC und MLG-R

2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Datenauswertung erfolgte unter Verwendung von Julius AI und wurde stichprobenartig mittels der IBM SPSS Statistics (Version 30) Software validiert. Die grafische Darstellung der Daten erfolgte ebenfalls mit Julius AI. Darüber hinaus wurde die deskriptive Statistik durch die Berechnung zentraler Kennwerte wie Mittelwert, Median, Standardabweichung, Spannweite sowie absoluter und relativer Häufigkeiten analysiert. Die Interrater-Reliabilität der MRT-Befunde wurde mittels Kappa-Koeffizienten (κ) sowie mittels prozentualer Übereinstimmung bestimmt. Um Zusammenhänge zwischen ordinalen oder metrischen Variablen zu untersuchen, wurden Korrelationsanalysen nach Spearmans Rho und Pearson verwendet. Die prognostische Aussagekraft der drei Klassifikationssysteme wurde mittels ROC-Analyse (Receiver Operating Characteristics) ermittelt. Die Berechnung der AUC (Area under the Curve) diente zur Beurteilung der diagnostischen Güte. Ein Signifikanzniveau von $p < 0,05$ wurde als statistisch signifikant definiert.

2.6 Ethik und Datenschutz

Zum Schutz der Privatsphäre wurde jedem Studienteilnehmer eine pseudonymisierte, studieninterne Study-ID zugeteilt. Die erhobenen Daten wurden in einer passwortgeschützten Datei auf einem zugriffsbeschränkten Computer im Unfallkrankenhaus Steiermark – Standort Graz und LKH Graz II – Standort West in der Abteilung für Radiologie gespeichert. Ausschließlich autorisierte Studienmitarbeiter*innen hatten Zugriff auf die Daten. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz geprüft und genehmigt.

3 Ergebnisse

3.1 Erhobene Patientendaten

Im Rahmen dieser Studie wurden 79 Muskelverletzungen bei männlichen Fußballern einer Bundesliga Mannschaft über 7,5 Jahre systematisch erfasst und analysiert. Im Rahmen der Datenverarbeitung konnten 3 Fälle in der Kategorie 'Ausfallzeit' und 11 Fälle in der Kategorie, verpasste Pflichtspiele' nicht eindeutig ermittelt werden und wurden daher von der Analyse ausgeschlossen.

Das Durchschnittsalter des Patientenkollektivs lag bei 23,15 Jahren ($SD \pm 4,16$), mit einem Median von 24 Jahren und einem Altersspektrum von 16 bis 33 Jahren. Die positionsspezifische Analyse zeigte, dass Verteidiger ($n = 35, 44,3 \%$) fast die Hälfte aller Verletzten ausmachten, gefolgt von Mittelfeldspielern ($n = 26, 32,9\%$), Stürmern ($n = 13, 16,5 \%$) und Torhütern ($n = 5, 6,3 \%$).

Die Analyse der Verletzungsumstände zeigt eine nahezu identische Verteilung zwischen Spiel und Training. Während 34 Verletzungen (43,0 %) während des Trainings auftraten, ereigneten sich 40 Verletzungen (50,6 %) im Match. Nur ein kleiner Teil von Muskelverletzungen ($n = 4, 4,6 \%$) ließ sich retrospektiv nicht eindeutig zuordnen oder ereignete sich in externen Situationen ($n = 1, 1,5 \%$), wie zum Beispiel bei Einsätzen für das Nationalteam.

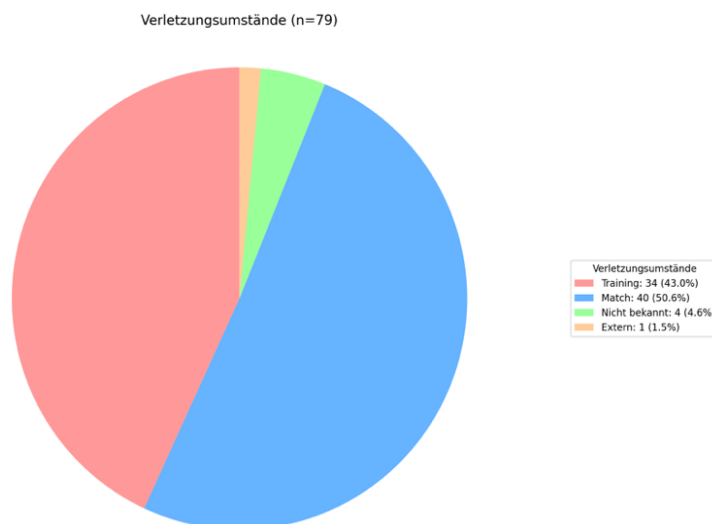


Abbildung 5: Verteilung der Verletzungsumstände

Die durchschnittliche Zeitspanne zwischen dem Verletzungsereignis und der MRT-Untersuchung lag bei 2,5 Tagen ($\pm 3,1$ Tage) mit einem Median von 2,5 Tagen. Die Mehrheit der MRT-Untersuchungen ($n = 63$, 79,7 %) erfolgte innerhalb der ersten drei Tage. Nur in 3,8 % ($n = 3$) der Fälle erfolgte die Untersuchung nach mehr als 7 Tagen.

Interessant ist auch die saisonale Verteilung von Verletzungen in bestimmten Monaten. Die Monate Jänner und September weisen mit jeweils 10 Fällen (je 12,7 %) die höchste Verletzungsinzidenz auf (Abb. 6). Dies könnte auf die erhöhte Spielbelastung zu Saisonbeginn und nach der Winterpause zurückzuführen sein.

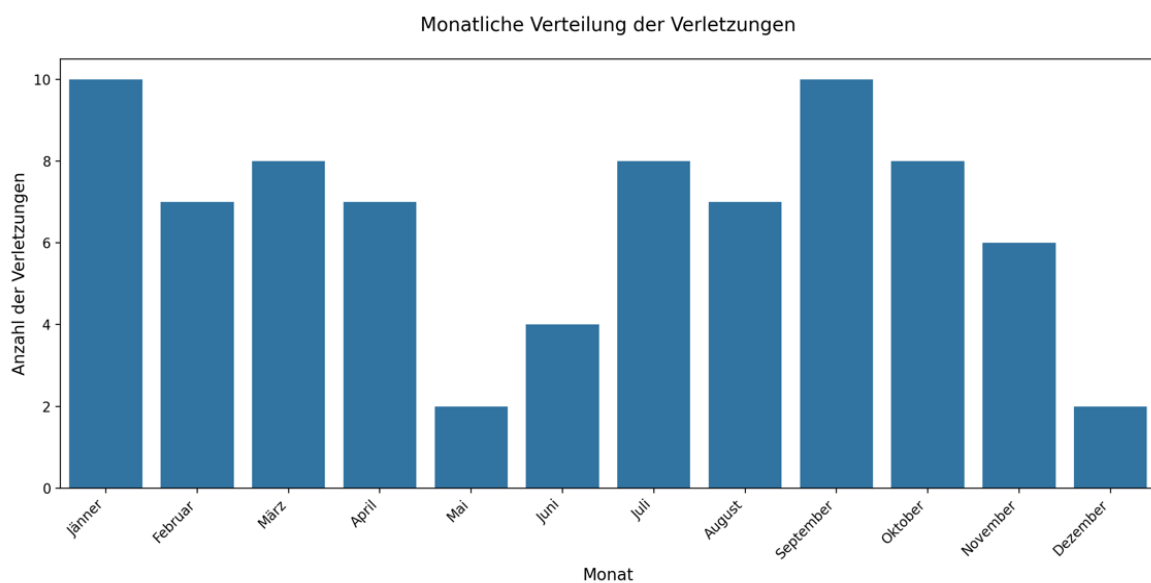


Abbildung 6: Monatliche Verteilung der Verletzungen

Die Ausfallzeit lag im Median bei 11 Tagen (Spannweite: 0 bis 104 Tagen) und einem Mittelwert von 17,0 Tagen ($\pm 17,2$). Die Einteilung der Muskelverletzung nach der FIFA Injury Severity Classification ergab folgende Verteilung. In 13,9 % ($n = 11$) der Fälle lagen Verletzungen ohne Ausfallzeiten vor. Zusätzlich wurden 2,5 % ($n = 2$) als minimal (2–3 Tage), 12,7 % ($n = 10$) als mild (4–7 Tage), 46,8 % ($n = 8$ –28 Tage) und 20,3 % ($n = 16$) als moderat und schwer eingestuft. Nur in 3,8 % ($n = 3$) war aufgrund fehlender Datenlage eine Zuteilung nicht möglich.

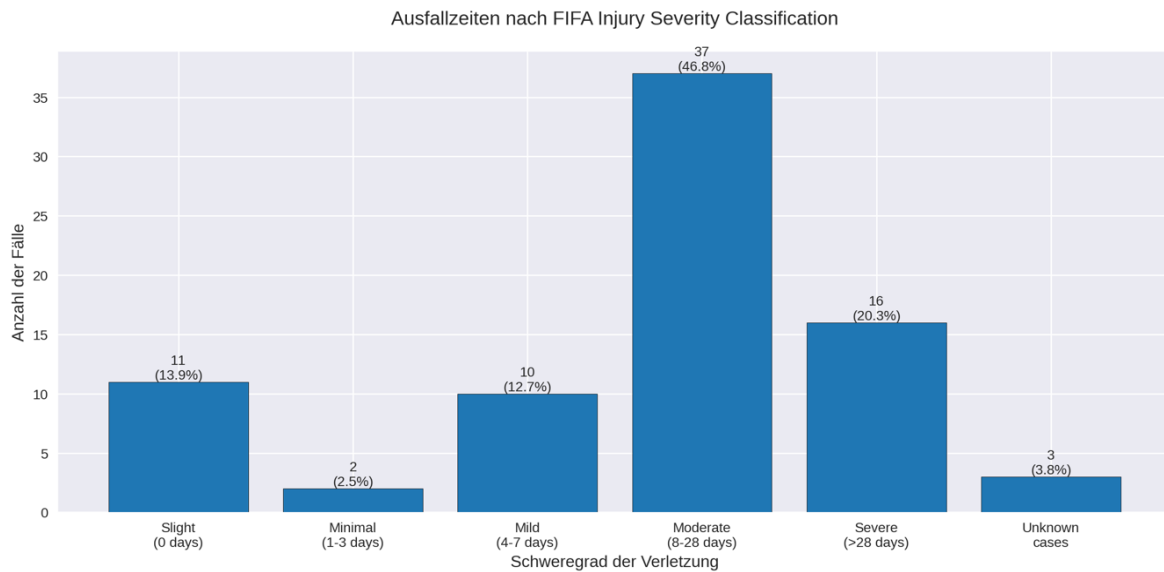


Abbildung 7: Ausfallzeiten nach FIFA Injury Severity Classification

Die Korrelationsanalyse zwischen der Ausfallzeit und der Spielposition hat statistisch signifikante Unterschiede gezeigt (Kruskal-Wallis-Test: $H = 11,74$; $p = 0,0083$). Abwehrspieler wiesen mit einem Median (Md) von 16,0 Tagen die längsten Ausfallzeiten auf, gefolgt von Mittelfeldspielern (Md = 10,5 Tagen), Stürmern (Md = 8,5 Tagen) und Torhütern. Bei Letzteren lag der Median bei 0,0 Tagen, was in erster Linie durch die geringe Fallzahl schwerer Verletzungen in dieser Gruppe erklärbar ist und demnach statistisch nicht belastbar zu interpretieren ist.

Die Analyse der Korrelation zwischen der Ausfallzeit und dem Alter der Spieler zeigte einen schwachen negativen Zusammenhang, der statistisch nicht signifikant war ($\rho = -0,0305$, $p = 0,8061$). Ein Vergleich der Altersgruppen (≤ 20 Jahre, 21 - 26 Jahre, ≥ 27 Jahre) im Hinblick auf die Ausfallzeiten ergab keine signifikanten ($H = 0,92$; $p = 0,6322$), aber dennoch tendenzielle Unterschiede. Junge Spieler (≤ 20 Jahre) wiesen mit einem Median von 16,5 Tagen die längsten Ausfallzeiten auf ($n = 24$). Bei der Altersgruppe von 21 bis 26 Jahren betrug die mediane Ausfallzeit 10,5 Tage ($n = 36$), während ältere Spieler (≥ 27 Jahre) eine mediane Ausfallzeit von 13,0 Tagen aufwiesen ($n = 16$). Obwohl die Rekonvaleszenzzeiten bei den Jüngsten um 3,5 bis 6 Tage länger ausfielen als bei den übrigen Altersgruppen, lässt sich aufgrund der ungleichen Gruppengröße und der großen Streuung keine statistisch belastbare Aussage ableiten. Ein stark positiver und hochsignifikanter Zusammenhang ließ sich hingegen zwischen der Anzahl verpasster Pflichtspiele und der Ausfallzeit beobachten ($\rho = 0,7466$; $p < 0,001$).

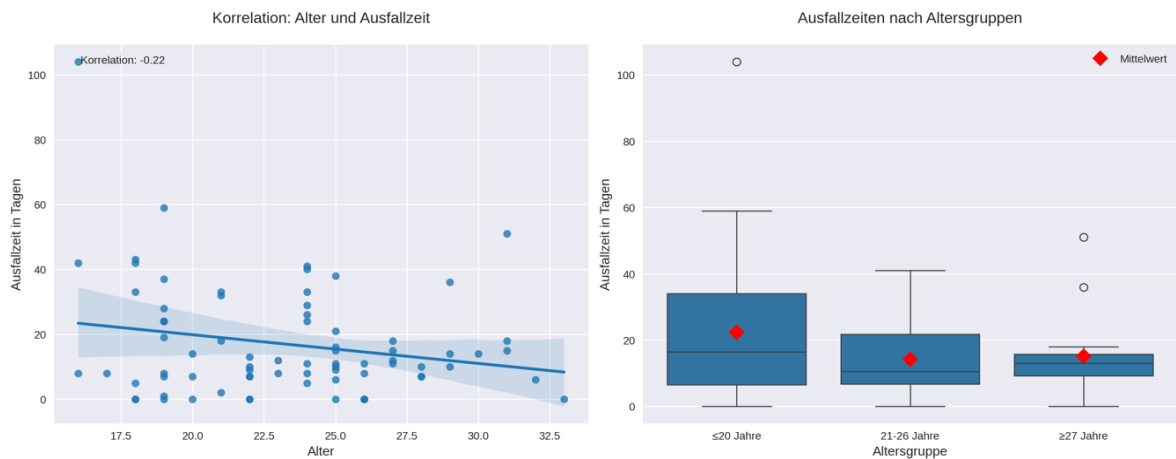


Abbildung 8: Korrelation der Ausfallzeiten nach Alter- und Altersgruppen

Die Analyse der erhobenen Patientendaten liefert wichtige Erkenntnisse zur Epidemiologie von Muskelverletzungen im Profifußball. Für das nachfolgende Kapitel der MRT-Diagnostik hatten diese Informationen jedoch keine Relevanz. Die radiologische Befundung basiert ausschließlich auf der Bildgebung, ohne jeglichen demografischen oder klinischen Kontext.

Tabelle 4: Charakteristika des Studienkollektivs

Demografische Daten	n (%)
Probanden (männlich)	79 (100.0)
Alter	
Mittelwert (Std.)	23.15 (\pm 4.16)
Min	16.0
Median (50%)	24.0
Max	33.0
\leq 20 Jahre	26
21-26 Jahre	37
\geq 27 Jahre	16
Position	
Torwart	5 (6.5)
Verteidigung	35 (44.3)
Mittelfeld	26 (32.9)
Sturm	13 (16.5)
Saison	
14/15	10 (12.7)
15/16	15 (19.0)
16/17	20 (25.3)
17/18	4 (5.1)
18/19	7 (8.9)
19/20	7 (8.9)
20/21	12 (15.2)
21/22	4 (5.1)
Monatliche Verteilung	
Jänner	10 (12.7)
Februar	7 (8.9)
März	8 (10.1)
April	7 (8.9)
Mai	2 (2.5)
Juni	4 (5.1)
Juli	8 (10.1)
August	7 (8.9)
September	10 (12.7)
Oktober	8 (10.1)
November	6 (7.6)
Dezember	2 (2.5)
Verletzungszeitpunkt	
Match	40 (50.6)
Training	34 (43.0)
Extern	1 (1.3)
Nicht bekannt	4 (5.1)
Verletzung bis MRT	
Tag der Verletzung (0 Tage)	7 (8.9)
1-3 Tage	56 (70.9)
4-7 Tage	13 (16.5)
>7 Tage	3 (3.8)
Mittelwert (SD)	2.5 (\pm 3.1)
Median (Min-Max)	2.0 (0.0-19.0)
Ausfallzeiten (FIFA)	
Sehr leicht (0 Tage)	11 (13.9)
Minimal (1-3 Tage)	2 (2.5)
Leicht (4-7 Tage)	10 (12.7)
Moderat (8-28 Tage)	37 (46.8)
Schwer (> 28 Tage)	16 (20.3)
Fälle (unbekannt)	3 (3.8)
Mittelwert (SD)	17.0 (\pm 17.2)
Median (Min-Max)	11.0 (0-104)

3.2 Ergebnisse der MRT-Diagnostik

In diesem Kapitel wurde das MRT-Bildmaterial der 79 dokumentierten Muskelverletzungen von zwei Fachärzten für Radiologie unter Anwendung eines festgelegten Bewertungsprotokolls unabhängig voneinander beurteilt. Nach Ausschluss von 10 Patienten, bei denen keine Muskelläsion bzw. Verletzung identifiziert werden konnte, verblieben 69 Patienten zur Analyse. Zur Sicherstellung einer objektiven und unabhängigen morphologischen Bewertung erfolgte die MRT-Diagnostik ausschließlich auf den Bilddaten ohne Bereitstellung klinischer Informationen.

Betroffene Muskelgruppen und Muskeln: Die am häufigsten betroffene Muskelgruppe war bei beiden Ratern die Oberschenkelflexoren (30,4 %), gefolgt von den Oberschenkelextensoren (23,2 %) und die Gruppe der Adduktoren (15,9 %). Die Gluteal-/Hüftmuskulatur zeigte ähnliche Verteilungen (R1: 15,9 %, R2: 14,5 %). Die Unterschenkelmuskulatur war bei beiden Ratern in 14,5 % der Fälle betroffen. Abweichungen in den Bewertungen zeigten sich vorrangig in anatomisch komplexen Übergangsbereichen wie der Hüft-/Gesäßmuskulatur und Adduktoren. In der Beurteilung der betroffenen Muskelgruppen zeigte sich eine Übereinstimmungsrate von 94,2 % bei einem Cohens Kappa (κ) von 0,926 zwischen beiden Ratern, was auf eine sehr hohe Interrater-Reliabilität hinweist. Auf Einzelmuskelebene waren am häufigsten der M. rectus femoris (20,3 %), M. biceps femoris (R1: 14,5 %, R2: 15,9 %) und M. semimembranosus (R1: 10,1 %, R2: 13,0 %) betroffen. Die Übereinstimmung auf Muskelebene (78,3 %) war geringer als auf Ebene der Muskelgruppen ($\kappa = 0,758$), was die Schwierigkeit in der exakten Abgrenzung benachbarter Muskeln unterstreicht.

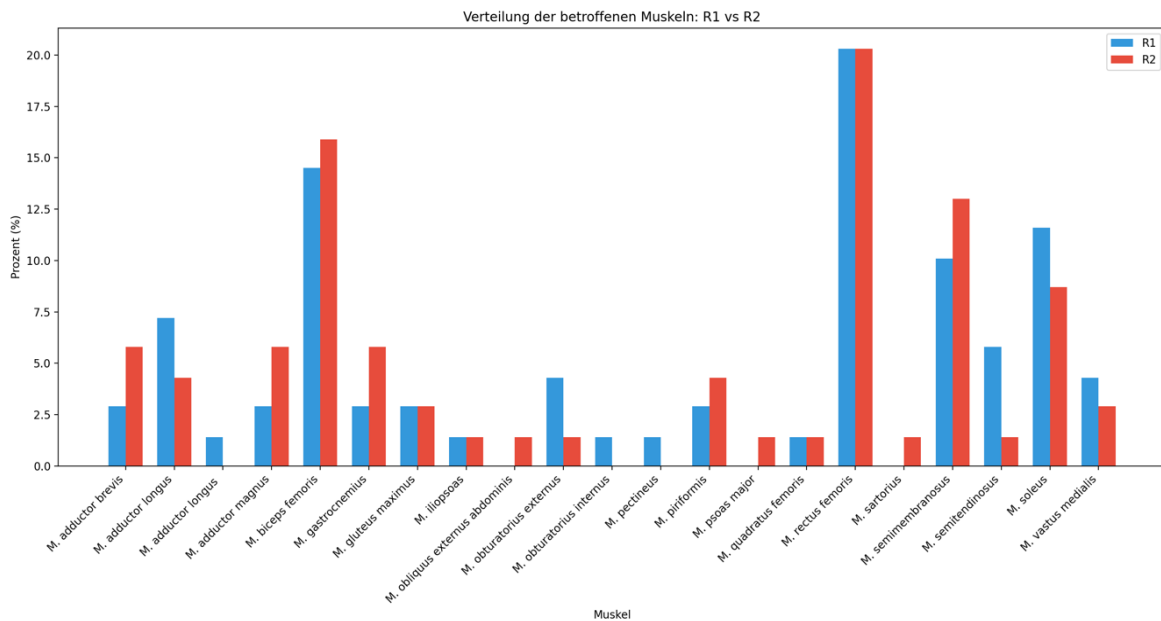


Abbildung 9: Verteilung der betroffenen Muskeln (R1 vs. R2)

Lokalisation und Gewebetyp: Signifikante Unterschiede zeigten sich in der Einschätzung der Verletzungslokalisierung. Während R1 die Mehrheit der Verletzungen im mittleren Bereich (medial > proximal > distal) des Muskels lokalisierte, lokalisierte R2 die Mehrheit der Verletzungen proximal (proximal > distal > medial). Die Übereinstimmungsrate von 60,9 % ($\kappa = 0,429$) zwischen den Ratern deutet trotz standardisierter Bewertungsrichtlinien auf eine Subjektivität in der Beurteilung hin. Ein konsistentes Bild zeigte sich jedoch in der Beurteilung des betroffenen Gewebetyps. Sowohl R1 als auch R2 diagnostizierten subfasziale Läsionen (58 %, n = 40) häufiger als myotendinöse Läsionen (42 %, n = 29). Die Interrater-Reliabilität von 85,5 % ($\kappa = 0,703$) weist auf eine hohe Übereinstimmung bei beiden Verletzungsarten. Subfasziale Läsionen zeigten eine hohe Prävalenz im M. rectus femoris (62,5 %) sowie im M. biceps femoris (81,8 %), während in der Adduktorengruppe, insbesondere im M. adductor longus (60 %), überwiegend myotendinöse Läsionen festgestellt wurden.

Sehnen- und Sehnenplattenbeteiligung: In der Mehrheit der Fälle wurde von beiden Radiologen keine Sehnenbeteiligung festgestellt (R1: 94,2 %, R2: 91,3 %). Die Übereinstimmungsrate lag bei 94,2 % ($\kappa = 0,554$) und ist somit als moderat einzustufen. Diese Ergebnisse sind durch die Häufigkeit von Verletzungen ohne Sehnenbeteiligung erklärbar. Sie stellen kein Indiz für eine geringe Reliabilität dar. Vielmehr ist dieses Ergebnis als statistisches Artefakt zu interpretieren. Deutlich größere Abweichungen zeigten sich in

der Beurteilung der Sehnenplattenbeteiligung, die R1 (34,8 %, n = 24) doppelt so häufig diagnostizierte wie R2 (15,9 %, n = 11). Die prozentuale Übereinstimmung war hier mit 76,81 % und einem Kappa-Wert ($\kappa = 0,452$) deutlich niedriger, was auf eine größere Variabilität in der Bewertung hindeutet.

Hämatom und epifasiales Ödem: Die Bewertung des Vorhandenseins eines Hämatoms oder epifaszialen Ödems offenbarte eine erhebliche Interobserver-Varianz. Während R1 in 20,3 % der Fälle ein Hämatom diagnostizierte, wurde dies durch R2 lediglich in 2,9 % der Fälle festgestellt. Die Übereinstimmungsrate (79,9 %) und das berechnete Cohens Kappa ($\kappa = 0,078$) lagen auf einem niedrigen Niveau. Die Breitenmessung von Hämatomen zeigte nur geringe Abweichungen: R1 erfasste im Mittel 1,04 cm, R2: 1,4 cm. Der berechnete exzellente ICC (0,950) ist aufgrund der ungleichen Fallzahlen als statistisch nicht signifikant einzustufen.

Ein epifasiales Ödem wurde von R1 in 73,9 % und von R2 in 59,4 % der Fälle diagnostiziert. Die Übereinstimmungsrate von 79,9 % mit einem moderaten Cohens Kappa ($\kappa = 0,554$) war deutlich besser als beim Hämatom. Die Messung der Ödembreite ergab durchschnittlich 0,29 cm (R1) vs. 0,49 cm (R2) mit einer mittleren Differenz von 0,068 cm und einem Messbereich von 0 bis 1,1 cm. Der dazu berechnete ICC (0,971) ist daher ebenso als exzellent zu bewerten.

Läsionsausdehnung: Die Läsionsausdehnung wurde in drei Dimensionen gemessen und zeigte konsistente systematische Abweichungen:

- Longitudinal: MW = 6,87 cm (R1) vs. 4,76 cm (R2), ICC (2,1) = 0,38
- Transversal: MW = 2,40 cm (R1) vs. 1,86 cm (R2), ICC(2,1) = 0,45
- Sagittal: MW = 1,96 cm (R1) vs. 1,23 cm (R2), ICC(2,1) = 0,36

R1 erfasste in allen drei Dimensionen größere Messwerte. Zudem zeigen die Dichteverteilungen, dass die Messungen von R2 kompakter und einheitlicher waren. Insgesamt zeigte sich eine mäßige Übereinstimmung zwischen den Ratern.

Klassifikation: Die Einteilung der Läsionen entsprechend der Klassifikationen und ihrer Graduierungen zeigte unterschiedliche Übereinstimmungen.

Interpretation der Kappa-Werte nach Landis & Koch (1977):

- Munich: gewichtetes Kappa ($\kappa = 0,387$) → mäßige Übereinstimmung
 - Exakte Übereinstimmung in 60,9 %
- BAMIC: gewichtetes Kappa ($\kappa = 0,533$) → moderate Übereinstimmung
 - Exakte Übereinstimmung in 44,9 %
- MLG-R: gewichtetes Kappa ($\kappa = 0,509$) → moderate Übereinstimmung
 - Exakte Übereinstimmung in 50,7 %

Obwohl das Munich-System im Vergleich zu den anderen Systemen eine höhere Übereinstimmung zwischen den Untersuchern aufwies, zeigte es Defizite bei der Differenzierungsstärke. Im Gegensatz dazu demonstrieren das BAMIC- sowie das MLG-R-System eine ausgewogene Balance zwischen Klassifizierungsschärfe und Interrater-Reliabilität, wobei eine deutlich über den Zufall hinausgehende Übereinstimmung erreicht wurde.

Munich: Im Munich-System wurden rund 50 % der Muskelverletzungen von beiden Radiologen konsistent dem Schweregrad 3a zugeordnet. Typ 3b-Läsionen wurden sowohl von R1 als auch von R2 am zweithäufigsten klassifiziert, wobei R2 tendenziell höher klassifiziert. Leichte bzw. funktionelle Muskelläsionen wurden von beiden Untersuchungen nur in Einzelfällen vergeben.

BAMIC: Die Läsionsgrade 1a und 2a wurden von beiden Radiologen in rund 50 % der Fälle identifiziert. R1 klassifizierte höhergradige Verletzungen (Grad 3a, 3c und 4) deutlich häufiger, während R2 wesentlich zurückhaltender war.

MLG-R: Es zeigte sich eine signifikante Diskrepanz in der Zuordnung zwischen Grad-2- und Grad-3-Läsionen. Während R1 in mehr als der Hälfte der Fälle eine Grad-3-Läsion feststellte, wurde dieser Befund von R2 deutlich seltener gestellt. Umgekehrt zeigte sich diese Tendenz bei Grad-2-Läsionen. Grad-1-Verletzungen wurden von beiden Untersuchern etwa gleich häufig klassifiziert. Läsionen der Grade 0 und 4 wurden von jedem Rater jeweils nur in einem Fall klassifiziert und repräsentieren damit Einzelfälle.

Tabelle 5: Klassifikationen - Häufigkeiten und Prozentangaben

Munich	R1 n (%)	R2 n (%)
Typ-1a	1 (1.3)	0 (0.0)
Typ-1b	2 (2.5)	1 (1.3)
Typ-2a	0 (0.0)	2 (2.5)
Typ-2b	14 (17.7)	1 (1.3)
Typ-3a	40 (50.6)	38 (48.1)
Typ-3b	19 (24.1)	27 (34.2)
Typ-4	2 (2.5)	1 (1.3)
NL	1 (1.3)	9 (11.4)
BAMIC	R1	R2
Grade 0a/b	4 (5.1)	1 (1.3)
Grade 1a	16 (20.3)	21 (26.6)
Grade 1b	8 (10.1)	6 (7.6)
Grade 2a	23 (29.1)	21 (26.6)
Grade 2b	9 (11.4)	19 (24.1)
Grade 2c	0 (0.0)	1 (1.3)
Grade 3a	2 (2.5)	0 (0.0)
Grade 3b	14 (17.7)	0 (0.0)
Grade 3c	1 (1.3)	1 (1.3)
Grade 4	1 (1.3)	0 (0.0)
NL	1 (1.3)	9 (11.4)
MLG-R	R1	R2
Grad 0	0 (0.0)	1 (1.3)
Grad 1	20 (25.3)	24 (30.4)
Grad 2	13 (16.5)	32 (40.5)
Grad 3	44 (55.7)	12 (15.2)
Grad 4	1 (1.3)	1 (1.3)
NL	1 (1.3)	9 (11.4)

3.3 Korrelation von Klinik und MRT

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die erhobenen Patientendaten den Ergebnissen der MRT-Diagnostik gegenübergestellt, um die prognostische Aussagekraft sowohl struktureller als auch klassifikatorischer MRT-Merkmale hinsichtlich der Ausfallzeit zu evaluieren.

Betroffene Muskelgruppe und Muskeln: Signifikante Unterschiede in der Ausfallzeit traten in Abhängigkeit von der betroffenen Muskelgruppe auf (R1: $p = 0,010$; R2: $p = 0,014$). Läsionen der Oberschenkelvorderseite, insbesondere der M. rectus femoris, zeigten die längsten Ausfallzeiten (Md: 21,5 Tage), gefolgt von Läsionen der Unterschenkelmuskulatur (Md: 16,5 Tage) und Oberschenkelrückseite (Md: 11,5 Tage). Die kürzesten Ausfallzeiten zeigten sich bei Läsionen der Adduktoren (R1/Md: 10 Tage, R2/Md: 8,0 Tage) und der Hüft-/Gesäßmuskulatur (R1/Md: 7,0 Tage, R2/Md: 7,5 Tage).

Lokalisation und Gewebetyp: Die Lokalisation der Verletzung (proximal, mittel, distal) wies bei beiden Untersuchern grenzwertige Signifikanzniveaus (R1: $p = 0,077$, R2: $p = 0,093$) auf. Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungsmuster war die Vergleichbarkeit und Interpretation der Ergebnisse jedoch stark eingeschränkt. Eine myotendinöse Beteiligung war bei beiden Ratern im Vergleich zu subfaszialen Läsionen mit einer tendenziell längeren Ausfallzeit assoziiert (Median: R1: 14,5 vs. 11,0 Tage / R2: 15,0 Tage vs. 11,0 Tage), wobei die Unterschiede nicht statistisch signifikant ausfielen (R1: $p = 0,572$; R2: $p = 0,754$).

Sehnen- und Sehnenplattenbeteiligung: Eine Sehnenbeteiligung war bei beiden Ratern mit längeren medianen Ausfallzeiten verbunden (R1: 33,0 vs. 11,5 Tage, R2: 25,5 vs. 12,0 Tage). Die ungleichen Gruppengrößen und fehlende statistische Signifikanz (R1: $p = 0,3470$, R2: $p = 0,2737$) schränken die Interpretation der Ergebnisse deutlich ein. Ein ähnliches Bild zeigte sich bei Läsionen mit Sehnenplattenbeteiligungen. Auch Beteiligungen der Sehnenplatte waren mit längeren Ausfallzeiten verbunden (Median: R1: 15,0 vs. 11,0 Tage; R2: 15,0 vs. 11,5 Tage), allerdings ohne statistische Unterschiede (R1: $p = 0,440$; R2: $p = 0,858$). Zudem zeigte sich eine deutliche Divergenz in der Diagnoserate zwischen den Ratern, wobei R1 etwa doppelt so häufig eine Beteiligung identifizierte wie R2.

Hämatom und epifasiales Ödem: Die Hämatombreite zeigte keine signifikante Korrelation mit der Ausfallzeit (R1: $\rho = 0,077$, $p = 0,514$; R2: $\rho = 0,151$, $p = 0,223$).

Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungen zwischen den Ratern sowie der insgesamt geringen Nachweisrate von Hämatomen (R1: n = 13, R2: n = 2) ist die Aussagekraft der Ergebnisse limitiert. Dennoch scheint der Zusammenhang klinisch plausibel, da Hämatome typischerweise mit höhergradigen Verletzungen assoziiert sind. Im Gegensatz dazu korreliert die Breite epifaszialer Ödeme schwach, aber signifikant, mit der Ausfallzeit (R1: $\rho = 0,255$, $p = 0,027$; R2: $\rho = 0,276$, $p = 0,024$). Zudem war bei beiden Ratern die Genesungszeit bei Vorliegen eines Ödems signifikant länger als bei dessen Fehlen (R1: $p = 0,021$; R2: $p = 0,041$).

Läsionsausdehnung: Ein signifikant positiver Zusammenhang zeigte sich für beide Rater für die Längsausdehnung einer Läsion und die Ausfallzeit (R1: $\rho = 0,345$, $p = 0,005$; R2: $\rho = 0,397$, $p = 0,001$). Auch die transversale Ausdehnung einer Läsion wies eine signifikante Korrelation mit der Rekonvaleszenzzeit auf (R1: $\rho = 0,339$, $p = 0,005$; R2: $\rho = 0,326$, $p = 0,008$). Im Gegensatz dazu wies die sagittale Läsion nur schwache bzw. keinen signifikanten Zusammenhang auf (R1: $\rho = 0,178$, $p = 0,152$; R2: $\rho = 0,244$, $p = 0,048$).

Klassifikation: Die Korrelationsanalysen zwischen den radiologischen Klassifikationssystemen und der Ausfallzeit ergaben signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer prognostischen Aussagekraft. Auffällig war, dass keines der drei Systeme bei beiden Ratern simultan signifikante Korrelationen zeigte.

Das Munich-System zeigte bei R2 eine signifikante Korrelation mit der Ausfallzeit ($\rho = 0,269$), während bei R1 kein signifikanter Zusammenhang nachweisbar war ($\rho = 0,042$). Die BAMIC wies bei R1 eine moderate signifikante Korrelation zur Ausfallzeit auf ($\rho = 0,314$), wohingegen bei R2 keine signifikante Assoziation festgestellt werden konnte ($\rho = 0,058$). Das MLG-R-System wies bei R1 eine schwache, jedoch signifikante Korrelation auf ($\rho = 0,250$), wohingegen sich bei R2 keine Korrelation zeigte ($\rho = 0,1379$).

Die ROC-Analyse zur Vorhersage schwerer Verletzungen (> 28 Tage) verdeutlicht die differenzierten prognostischen Fähigkeiten der untersuchten Systeme. Die BAMIC erzielte mit einem AUC-Wert von 0,62 die beste Vorhersagekraft, gefolgt von der MLG-R mit einer AUC von 0,57. Das Munich-System wies mit einem AUC von 0,48 eine prädiktive Leistung knapp unter dem Zufallsniveau auf.

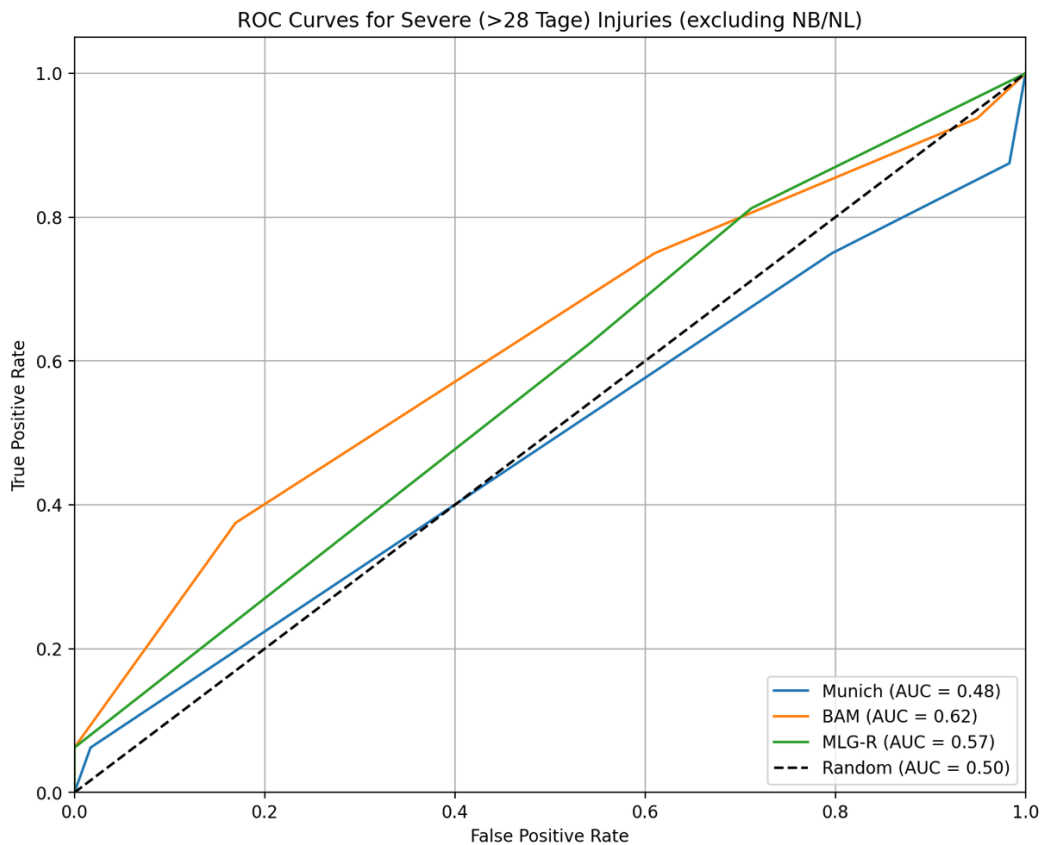


Abbildung 10: ROC Curves for Severe (>28 Tage) Injuries

Auch auf Ebene der Gesamtstichproben, unabhängig von der Rater Zuordnung, bestätigten sich diese Tendenzen. Die BAMIC zeigte die stärkste Korrelation zur Ausfallzeit ($\rho = 0.31$). Das MLG-R System zeigte eine moderate Korrelation ($\rho = 0.24$), wohingegen die Munich-Klassifikation nahezu keinen Zusammenhang erkennen ließ.

Die Analyse der Klassifikationsgrade zeigte für die BAMIC-Klassifikation einen signifikanten Anstieg der mittleren Ausfallzeit in Abhängigkeit vom Schweregrad. Ein ähnlicher Trend, jedoch weniger ausgeprägt, war auch bei der MLG-R erkennbar. Beim Munich System hingegen ließ sich kein konsistenter Zusammenhang feststellen. Die Aussagekraft dieser Beobachtungen lässt sich durch die teils erhebliche Streuung und einzelne Ausreißer erklären.

Diese Ergebnisse sind von klinischer Relevanz, da die Wahl des Klassifikationssystems und die damit verbundene Graduierung nicht nur Einfluss auf die zu erwartende Rehabilitationsdauer, sondern auch auf die Therapie- bzw. RTP-Planung hat.

Abbildungen 11 – 13 zeigen Beispiele von Muskelverletzungen, die gemäß den oben genannten Klassifikationssystemen graduiert wurden:

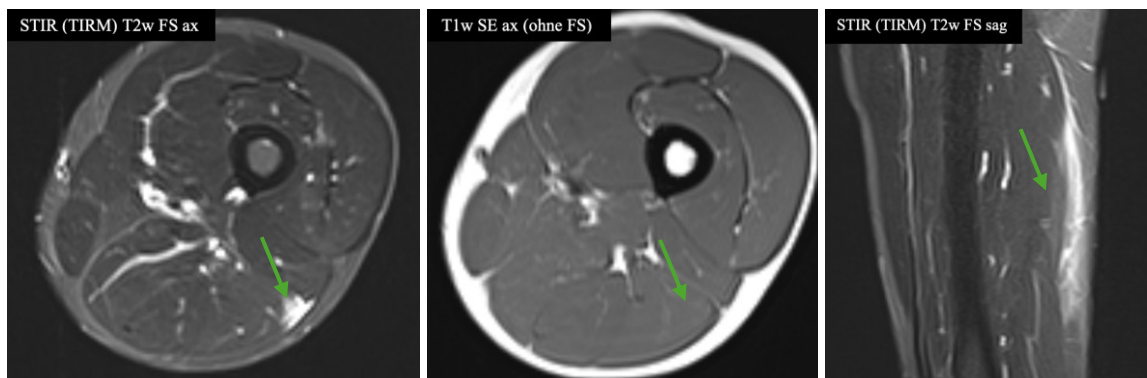


Abbildung 11: Muskelfaserriss des M. biceps femoris.

MRT eines 24-jährigen Fußballspielers, welches einen Tag nach Verletzung durchgeführt wurde (Abb. 11). Subfasziale Läsion im M. biceps femoris (Pfeile), die sich als Flüssigkeitsansammlung in den STIR-Sequenzen ohne Nachweis eines Hämatoms in T1 äußert. Die Längsausdehnung beträgt <math>< 5\text{ cm}</math>, die Ausdehnung in den Muskel <math>< 10\%</math>. Klassifikationen: BAMIC 1a, MLG-R Grad 2, Munich 3a. Die Ausfallszeit betrug 26 Tage.

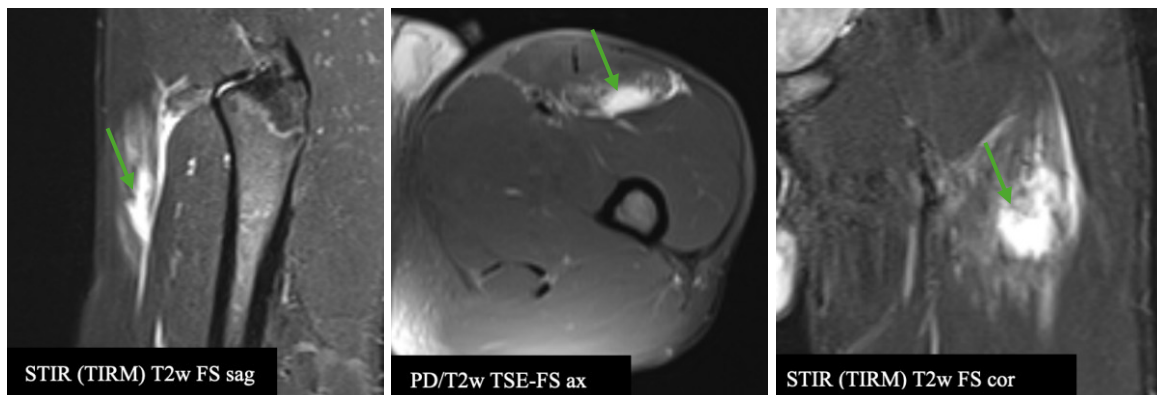


Abbildung 12: Muskelbündelriss des M. rectus femoris.

MRT eines 20-jährigen Fußballspielers, welches 6 Tage nach Verletzung durchgeführt wurde (Abb. 12). Subfasziale Läsion im M. rectus femoris (Pfeile), die sich als Flüssigkeitsansammlung in den PD/T2 TSE-FS und STIR-Sequenzen äußert. Die Längsausdehnung beträgt $> 15\text{cm}$, die Ausdehnung im Muskel $> 50\%$. Klassifikationen: BAMIC 3a, MLG-R Grad 3, Munich 3b. Die Ausfallszeit betrug 59 Tage.



Abbildung 13: Proximale Ruptur der Sehne des M. semimembranosus.

MRT eines 21-jährigen Fußballspielers, welches am Verletzungstag durchgeführt wurde (Abb. 13). Am proximalen Sehnenansatz des M. semimembranosus aufgehobene Sehnenkontinuität mit Retraktion des Sehnenstumpfs um ca. 1 cm. Flüssigkeitsäquivalentes, hyperintense Signalalteration der umliegenden Weichteile in flüssigkeitssensitiven Sequenzen (STIR, PD/T2w-FS), vereinbar mit Hämatom/Ödem. Kein Nachweis einer knöchernen Avulsion. Gemeinsamer Ursprung BFlh/ST unauffällig. Klassifikationen: BAMIC 4c, MLG-R Grad, 4⁺ Munich 4. Die Ausfallzeit betrug 36 Tage.

4 Diskussion

4.1 Wertigkeit der MRT-Diagnostik und deren Aussagekraft für die Rekonvaleszenz

Die Magnetresonanztomografie hat sich im Leistungssport, wie auch im Profifußball, als unverzichtbares bildgebendes Diagnoseverfahren etabliert (12, 26). Sie liefert wegweisende Informationen, die über die Diagnosestellung hinaus direkt in die Prognose, Rehabilitationsplanung und RTP-Entscheidungen einfließen (12, 26, 52). Die systematische Erfassung kritischer morphologischer Parameter ermöglicht eine differenzierte Risikoabschätzung hinsichtlich prolongierter Rekonvaleszenzzeiten und potenzieller Rezidivverletzungen (49, 54).

Aufgrund der intensiven körperlichen Belastung, der dichten Spielpläne sowie substanzieller wirtschaftlicher Folgen von Verletzungen ist eine präzise Risikoeinschätzung im Spitzensport von zentraler Bedeutung (52, 58). Die MRT liefert jedoch nur prognostische Informationen, die keine genaue Vorhersage erlauben (40, 45). Zusätzlich zur Bildgebung spielen das leistungsphysiologische Ausgangsniveau des Sportlers, wettkampfspezifische Anforderungen und Rehaqualität für die Ausfallzeit eine Rolle (34, 36). In der täglichen Praxis ermöglicht die MRT eine initiale Risikoeinschätzung, deren Aussagekraft im weiteren Verlauf durch eine umfassende klinische Untersuchung an Genauigkeit gewinnt (51). Auch wenn ein Befund ohne sichtbare Rissbildung eine frühe Steigerung der Belastung erlaubt, ist das Erreichen funktioneller Meilensteine im Reha-Verlauf unerlässlich (28, 34).

Mehrere Expert*innen sind der Meinung, dass die funktionelle Erholung von Athletinnen und Athleten der vollständigen Rückbildung der MRT-Signale zeitlich vorausgeht (12, 36). Reurink et al. zeigten, dass klinisch ausgeheilte Hamstringsverletzungen zum Zeitpunkt des Return to Play (RTP) in 89 % der Fälle weiterhin intramuskuläre Signalvermehrungen und in 42 % fibrotische Gewebeveränderungen aufweisen (36). Mehrere Studien belegen diese persistierenden Signalveränderungen, die teilweise über Monate hinweg nachweisbar sind (38, 39). Die Bestimmung des Zeitpunkts für die Rückkehr in den Sport sollte daher primär anhand funktioneller Parameter und klinischer Testergebnisse erfolgen (36).

Ein zusätzlicher Nutzen der Magnetresonanztomografie ist die Verbesserung der Risikokommunikation zwischen dem medizinischen Fachpersonal, dem/der Athlet*in und dem Trainerstab. Die Prognoseabschätzung wird durch bildgebende Befunde unterstützt, die auf objektiven und reproduzierbaren Ergebnissen beruhen (12, 13, 59, 60). Diese Transparenz erleichtert die Abstimmung zwischen allen Parteien, reduziert den Entscheidungsdruck und erleichtert die Priorisierung einer risikobewussten Reha-Planung (12, 66). Während isolierte myofasziale Läsionen eine progressivere Vorgehensweise zulassen, rechtfertigen Verletzungen mit Beteiligung von Sehnen- und Bindegewebe ein konservatives Vorgehen (49, 54). Grundlage hierfür ist eine standardisierte MRT-Befundung, um Interobserver-Unterschiede zu minimieren und Ergebnisse der Bildgebung gezielt in Rehakonzepte zu integrieren (12). Im professionellen Leistungssport hat sich daher die enge Kooperation von Teamärzt*innen mit erfahrenen Radiolog*innen bewährt (65).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die MRT zwar entscheidende Informationen zur Verletzungsschwere liefert, die Ausfallzeit und das Risiko einer Rezidivverletzung aber nicht eindeutig festlegen kann (12). Ihren größten Nutzen entfaltet sie, wenn Bild- und Klinikbefunde miteinander abgestimmt werden und in ein klar definiertes sportspezifisches Rehakonzept miteinfließen (36, 41).

4.2 Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Studienlage

Die vorliegende Arbeit liefert bedeutsame Einblicke in die Diagnostik von Muskelverletzungen bei Profifußballern. Um die Ergebnisse dieser Arbeit umfassend einzuordnen, ist ein Abgleich mit der aktuellen Studienlage unerlässlich.

Die Studie untersuchte 79 Muskelverletzungen einer männlichen Profi-Fußballmannschaft der höchsten österreichischen Spielklasse über einen Zeitraum von 7,5 Jahren und entspricht dem Umfang vergleichbarer Validierungsstudien (31, 34). Das Durchschnittsalter des Patientenkollektivs von 23,15 Jahren ist kongruent mit jenen aus groß angelegten Studien, die ebenfalls Muskelverletzungen im Fußball untersuchten (18, 35, 42).

Die Monate Jänner und September wiesen im Studienzeitraum die höchsten Verletzungsinzidenzen auf. Eine Erklärung dafür könnte die erhöhte körperliche Belastung zu Beginn der intensiven Wettkampfphasen im Herbst und der Start der Vorbereitungsphase

nach der Winterpause darstellen. Gleichzeitig zeigen die Daten, dass 50,6 % aller Verletzungen während dem Spiel und 43 % der Verletzungen innerhalb des Trainings aufgetreten sind und nur ein kleiner Teil (6,3 %) nicht eindeutig zugeordnet werden konnte. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Daten aus Langzeitstudien wie der UEFA Elite Club Injury Study, die einen Anteil von 57 % der Verletzungen während des Spiels und 43 % im Training dokumentierte (6).

In der vorliegenden Studie betrug die durchschnittliche Zeitspanne zwischen Verletzungsereignis und MRT im median 2,5 Tage, wobei die Mehrheit (79,7 %) der Untersuchungen innerhalb der ersten 3 Tage erfolgte. Dies entspricht den vorherrschenden Expert*innenmeinungen, die, obwohl derzeit keine klare Evidenz vorliegt, die Durchführung einer MRT-Untersuchung innerhalb der ersten 3 Tage nach Verletzung empfehlen (18, 27, 50).

In der positionsspezifischen Analyse zeigte sich, dass Verteidiger mit 44,3 % fast die Hälfte aller Muskelverletzungen ausmachten und statistisch signifikant längere Ausfallzeiten aufwiesen. Am zeithäufigsten von einer Muskelverletzung betroffen waren Mittelfeldspieler (32,9 %), dann Stürmer (16,5 %) und Torhüter (6,3 %). Dies ist jedoch in erster Linie durch die geringe Fallzahl zu erklären, da in der Literatur bisher keine Korrelation zwischen Spielposition und Ausfallzeit eruiert werden konnte (31).

Zahlreiche Studien weisen darauf hin, dass das Alter keinen signifikanten Einfluss auf die Ausfallzeit hat (33, 37, 45). Auch die vorliegende Arbeit konnte nur eine schwach negative, statistisch nicht signifikante Korrelation zwischen diesen beiden Variablen aufzeigen. Es gilt jedoch als belegt, dass sich das Risiko, eine Muskelverletzung zu erleiden, in der Regel mit dem Alter erhöht (1).

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik der Bewertung von Muskelläsionen durch zwei unabhängige Radiologen auf Basis einer Interrater-Reliabilität unter Anwendung eines 1,5 Tesla-MRT-Protokolls, entspricht den Standards anerkannter Validierungsstudien (18, 34). Jüngere Publikationen von Valle et al. (2022) und Zein et al. (2024) zeigen hingegen einen klaren Trend zur Implementierung von 3-Tesla-MRT-Protokollen und computergestützten Bildanalysen (42, 55).

Muskuläre Läsionen traten am häufigsten im Bereich des Oberschenkels auf, wobei ein signifikanter Anteil die Hamstrings betraf, gefolgt von Verletzungen der Extensoren, Adduktoren und der Wadenmuskulatur. Diese Verteilung deckt sich mit Daten internationaler epidemiologischer Studien: In der Arbeit von Ekstrand et al. (2011), in welcher 51 Fußballmannschaften eingeschlossen wurden, konnten über einen Zeitraum von 8 Jahren 2908 Muskelverletzungen dokumentiert werden (56). Es konnte nachgewiesen werden, dass 92 % aller Muskelverletzungen die 4 Hauptmuskelgruppen der unteren Extremität betrafen: Hamstrings (37 %), Adduktoren (23 %), Quadriceps (19 %) und Wadenmuskulatur (13 %) (56). Signifikante Unterschiede zwischen den betroffenen Muskelgruppen zeigten sich bei der Ausfallzeit. Die längsten Rekonvaleszenzzeiten wurden bei Läsionen der vorderen Oberschenkelmuskulatur, speziell des M. rectus femoris, verzeichnet, während Adduktoren- sowie Muskelverletzungen im Hüft- und Glutealbereich mit den geringsten Regenerationszeiten assoziiert waren. Im Gegensatz dazu existieren Untersuchungen, die bislang keine signifikante Korrelation zwischen den betroffenen Muskelgruppen und der Dauer der Rekonvaleszenz nachweisen konnten (9). Auf Einzelmuskelebene war der M. biceps femoris innerhalb der ischiocruralen Muskulatur am häufigsten betroffen. Dies entspricht der aktuellen Literatur, die diesen Muskel in bis zu 84 % der Fälle bei Hamstrings-Verletzung identifizierte (5). Beim betroffenen Gewebetyp zeigten myotendinöse Läsionen, speziell bei Beteiligung des Übergangsbereichs (MTJ), tendenziell längere Ausfallzeiten, wenngleich nicht signifikant. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Sehnen- und Sehnenplattenbeteiligungen. Auch ohne das Erreichen einer statistischen Signifikanz sind diese beobachteten Trends von hoher Relevanz und werden durch Literaturquellen zahlreich belegt: Die Beteiligung von Sehnenstrukturen, sowohl intramuskulärer Sehnen als auch Muskelsehnenübergänge, geht mit signifikant längeren Ausfallzeiten und einer höheren Reinjury-Rate einher (26, 48, 31, 53).

Da die Beurteilung der Verletzungslokalisation (proximal, mittig, distal) zwischen den Radiologen eine derart geringe Übereinstimmungsrate ($\kappa = 0,429$) zeigte, war die Vergleichbarkeit und Interpretation der Ergebnisse im Kontext der aktuellen Studienlage stark eingeschränkt. Dessen ungeachtet zeigt die Mehrheit der Studien, dass die einfache Zuordnung einer Verletzung in proximal, mittig und distal zum Muskelbauch keine prognostische Relevanz für die Ausfallzeit hat (9, 26).

Bei der Feststellung sowohl von Ödemen als auch von Hämatomen zeigte sich eine geringe Interrater-Übereinstimmung. Das Vorhandensein eines Ödems war bei beiden Radiologen mit einer signifikant längeren Ausfallzeit assoziiert, und die Breite eines epifaszialen Ödems korrelierte, wenn auch nur schwach, ebenfalls signifikant mit der Ausfallzeit. In der Literatur wird die prognostische Wertigkeit des Vorliegens eines Hämatoms und Ödems nach wie vor ambivalent diskutiert (12, 54). Obwohl anzunehmen ist, dass größere strukturelle Muskelverletzungen mit konsekutiver Einblutung und Hämatombildung mit längeren Ausfallzeiten verbunden sind, konnte dies in Studien bislang nicht eindeutig belegt werden (15, 34, 50). Das Vorhandensein von epifaszialen Ödemen ist ein häufiger Begleitbefund bei Muskelverletzungen und scheint ebenso wie das Hämatom nicht signifikant mit längeren Ausfallzeiten assoziiert zu sein (12).

Die longitudinale und transversale Läsionsausdehnung zeigte eine signifikant positive Korrelation mit der Ausfallzeit. Nur ein schwacher bis keinen Zusammenhang fand sich hingegen bei der sagittalen Ausdehnung. Diese Ergebnisse decken sich größtenteils mit der aktuellen Studienlage (50). Die longitudinale und die transversale Ausdehnung einer Läsion werden als relevante prognostische Parameter für die Dauer bis zur Rückkehr zur sportlichen Aktivität angesehen. In der Literatur wird jedoch für beide Variablen eine unterschiedlich ausfallende Evidenz berichtet (18, 26). Die reine Läsionsausdehnung, wie Risslänge oder Ödemausdehnung, weist in der Literatur hingegen eine heterogene Datenlage auf (26, 35, 54). Mehrere Arbeiten, einschließlich der von Reurink et al. (2015) und Tears et al. (2022), konnten nur schwache bzw. inkonsistente Zusammenhänge mit der RTP feststellen (34, 54). Ekstrand et al. bezeichnete dies als „kontraintuitiv“, da anzunehmen wäre, dass eine größere Rissgröße und Ödemausdehnung auch längere Ausfallzeiten bedingen würde (26). Demgegenüber zeigen zahlreiche Studien, dass gemäß gängiger Klassifikationssysteme mit steigendem Verletzungsgrad neben der Läsionsgröße auch die Ausfallzeit zunimmt (18, 26, 33, 43). Auch wenn höhere Verletzungsgrade mit größeren Gewebedefekten assoziiert sind, korreliert die quantitative Messung einer Läsion nicht immer stark oder konsistent mit der Ausfallzeit (26). Der Schweregrad einer Läsion umfasst weit mehr als die bloße Defektausdehnung (9). Zentrale Merkmale, wie das Vorliegen einer strukturellen Diskontinuität, das Ausmaß der Sehnen- oder Bindegewebsbeteiligung, speziell im Bereich des muskulotendinösen Übergangs oder der intramuskulären Sehne, und die exakte anatomische Lage der Läsion in Bezug auf diese Schlüsselstrukturen, werden von mehreren

Expert*innen als die entscheidenden Determinanten für eine verlängerte RTP angesehen (12, 42, 47, 54). Empirische Untersuchungen legen nahe, dass selbst kleine Läsionen mit Beteiligung kritischer Sehnenanteile längere Ausfallzeiten zu Folge haben als isolierte großflächige Muskelläsionen (42).

Die Analyse der drei Klassifikationssysteme zeigte eine mäßige bis moderate Interrater-Reliabilität (Munich: $\kappa = 0,387$; BAMIC: $\kappa = 0,533$; MLG-R: $\kappa = 0,509$) und offenbarte divergierende Ergebnisse in der prognostischen Einschätzung zwischen den Radiologen. Während beim BAMIC-System die mittlere Ausfallzeit systematisch mit zunehmendem Schweregrad anstieg, war dieser Trend beim MLG-R nur schwach und beim Munich-System nicht erkennbar. Bei schweren Verletzungen (> 28 Tage) zeigte die BAMIC mit einem AUC von 0,62 die beste Vorhersagekraft, gefolgt von der MLG-R (AUC 0,57). Das Munich-System hingegen lag mit einem AUC von 0,48 auf Zufallsniveau. In der aktuellen Literatur wird dem BAMIC-System (κ -Werte 0,80-1,00) und Munich-System (κ -Werte 0,82-1,00) eine gut bis exzellente Interrater-Reliabilität zugeschrieben (33, 43). In der bisher einzig vorhandenen Validierungsstudie zum MLG-R-System von Valle et al. (2022), die jedoch ebenso Entwickler dieses Systems sind, konnte sogar eine exzellente Intra- und Inter-Observer Reliabilität ($\kappa > 0,93$) festgestellt werden (42). Ein systematische Übersichtsarbeit von Wangenstein et al. (2017) beschrieb hingegen nur eine mäßig bis moderate Inter-Rater-Übereinstimmung ($\kappa = 0,509$), deutlich unter den von Valle et al. angegebenen Werten (57).

4.3 Limitationen und Ausblick für Praxis und Forschung

Die retrospektive Beobachtungsstudie zur MRT-Diagnostik von Muskelverletzungen bei Profifußballern weist methodische Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Das retrospektive Studiendesign stellt dabei eine zentrale methodische Einschränkung dar. Studien dieser Art sind anfälliger für Verzerrungen und Einschränkungen hinsichtlich ihrer Datenqualität (61). Die Nutzung bestehender medizinischer Aufzeichnungen und externer Datenquellen, wie „transfermarkt.de“, kann die Kontrolle über die Vollständigkeit und Konsistenz der Daten in der vorliegenden Studie signifikant einschränken.

Die beobachteten Unterschiede zwischen den beiden Radiologen verdeutlichen zudem die subjektive Komponente radiologischer Beurteilungen, sind jedoch im Rahmen einer Interrater-Variabilitätsstudie grundsätzlich zu erwarten (62). Dennoch sind die deutlichen Abweichungen kritisch zu hinterfragen, da sie Auswirkungen auf die Reliabilität und klinische Anwendbarkeit der Klassifikationssysteme haben können. Die Interrater-Abweichungen zeigten sich vor allem bei der Lokalisation der Veränderungen in anatomisch komplexen Übergangsbereichen wie der Hüft-/Gesäßmuskulatur und den Adduktoren. Auch die Einschätzungen hinsichtlich des Vorliegens von Ödemen und Hämatomen zeigten erhebliche Abweichungen zwischen den Radiologen.

Die geringe Stichprobengröße von 51 Spielern und Erfassung von lediglich 79 Muskelverletzungen schränken die statistische Aussagekraft der Studie ein, insbesondere im Hinblick auf die Validität von Subgruppenanalysen. Im Rahmen der Datenverarbeitung und MRT-Analyse wurden 10 Fälle aufgrund nicht eindeutig zuordenbarer Verletzungen von der Analyse ausgeschlossen, was ein potenzielles Selektionsbias-Risiko mit sich bringt. Dies kann zu einer Unterrepräsentation einzelner Verletzungskategorien oder Schweregrade führen und dadurch die externe Validität der Resultate substantiell limitieren. Aufgrund des monozentrischen Studiendesigns und der ausschließlichen Einbeziehung männlicher Profifußballer eines österreichischen Bundesligavereins ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Patientenpopulationen nur eingeschränkt möglich.

Trotz der aufgezeigten Limitationen liefert die Studie wichtige Erkenntnisse für die klinische Praxis. Die Läsionsausdehnung (longitudinal und transversal) und Größe eines epifaszialen Ödems zeigte einen signifikant positiven Zusammenhang mit der Ausfallzeit. Unter den Klassifikationssystemen wies die BAMIC im Vergleich zur MLG-R und Munich die höchste prognostische Validität für die Vorhersage schwerer Verletzungen auf, was deren Integration in die klinische Routinediagnostik rechtfertigt (35). Angesichts der nur moderaten Aussagekraft all dieser Systeme sollten radiologische Befunde aber stets gemeinsam mit klinischen Parametern interpretiert werden (12). Die teils deutlichen Abweichungen zwischen den Radiologen in der Beurteilung unterschiedlicher MRT-Merkmale unterstreicht die Notwendigkeit eines standardisierten Bewertungsprotokolls sowie Übung bzw. Erfahrung in der muskuloskelettalen Radiologie. Zusätzlich könnte die Integration klinischer Informationen in den Befundungsprozess die diagnostische Genauigkeit erhöhen.

Die aufgezeigten Limitationen und Schwächen innerhalb der Studie verdeutlichen den Bedarf nach weiterführender Forschung. Prospektive, multizentrische Studien mit größeren Fallzahlen unter dem Einsatz standardisierter Bewertungsprotokolle sind erforderlich, um die prognostische Validität der MRT bei Muskelverletzungen evidenzbasiert zu evaluieren. Eine systematische Erfassung relevanter klinischer Parameter neben der radiologischen Diagnostik könnte zudem eine umfassendere Analyse der prognostischen Faktoren ermöglichen. Mit dem technologischen Fortschritt der letzten Jahre in der Medizin und bei der künstlichen Intelligenz rücken automatisierte und funktionelle Bildanalyseverfahren zunehmend in den Fokus der radiologischen Forschung (63). Durch den Einsatz von Machine-Learning-Modellen könnten die Quantifizierung von Läsionsgrößen und die Analyse der Gewebeteilung zu einer objektiven und standardisierten Diagnostik beitragen (42, 64). Innovative Techniken wie 7-Tesla-MRT, Diffusion-Tensor-Bildgebung und MR-Elastografie stellen vielversprechende Ansätze dar, und sollten speziell in der muskuloskelettalen Bildgebung durch weitere Studien systematisch untersucht werden (63). Ihr Einsatz könnte in Zukunft bislang noch unberücksichtigte prognostische Parameter erfassen.

5 Literaturverzeichnis

- (1) Müller-Wohlfahrt HW, Ueblacker P, Hänsel L, Betthäuser A. Muskelverletzungen im Sport. 3. Aufl. Georg Thieme Verlag; 2018.
- (2) Aumüller G, Aust G, Engele J, Maio G, Kirsch J. Duale Reihe Anatomie. 5. Aufl. Georg Thieme Verlag; 2020.
- (3) Schünke M, Schulte E, Schumacher U. PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie. 6. Aufl. Thieme; 2022.
- (4) Bloch W, Hotfiel T, Ueblacker P, Tischer T, Bily W, Engelhardt M. Anatomie/Physiologie der Muskelheilung. In: Muskel- und Sehnenverletzungen: GOTS-Expertenmeeting Burg/Spreewald vom 26.05.- 29.05.2016. 1. Aufl. Verlags-Comptoir Rolle; 2017.
- (5) Ott H, Hirschmüller A, Weisskopf L: Epidemiologie, Diagnostik und Klassifikation von Muskelverletzungen. OUP 2017; 2: 69–74 DOI 10.3238/oup.2017.0069–007
- (6) Ekstrand J, Hägglund M, Waldén M. Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study. *Br J Sports Med.* 2011 Jun;45(7):553-8. doi: 10.1136/bjism.2009.060582. Epub 2009 Jun 23. PMID: 19553225.
- (7) Nührenbörger C, Seil R, Ueblacker P, Hotfiel T, Drews B, Bloch W, Epidemiologie von Muskelverletzungen im Sport. In: Muskel- und Sehnenverletzungen: GOTS-Expertenmeeting Burg/Spreewald vom 26.05.- 29.05.2016. 1. Aufl. Verlags-Comptoir Rolle; 2017.
- (8) Seil R, Nührenbörger C, Ueblacker P, Hotfiel T, Drews B, Bloch W, Klassifikationen von Muskelverletzungen im Sport. In: Muskel- und Sehnenverletzungen: GOTS-Expertenmeeting Burg/Spreewald vom 26.05.- 29.05.2016. 1. Aufl. Verlags-Comptoir Rolle; 2017.
- (9) Hamilton B, Alonso JM, Best TM. Time for a paradigm shift in the classification of muscle injuries. *J Sport Health Sci.* 2017 Sep;6(3):255-261. doi: 10.1016/j.jshs.2017.04.011. Epub 2017 Apr 27. PMID: 30356632; PMCID: PMC6189241.
- (10) Reiser M, Kuhn FP, Debus J. Duale Reihe Radiologie. 2. Aufl. Georg Thieme Verlag; 2006.
- (11) Paton BM, Court N, Giakoumis M, Head P, Kayani B, Kelly S, Kerkhoffs GMMJ, Moore J, Moriarty P, Murphy S, Plastow R, Pollock N, Read P, Stirling B, Tulloch L, van Dyk N, Wilson MG, Wood D, Haddad F. London International Consensus and Delphi study on hamstring injuries part 1: classification. *Br J Sports Med.* 2023 Mar;57(5):254-265. doi: 10.1136/bjsports-2021-105371. Epub 2023 Jan 17. PMID: 36650035.

- (12) Isern-Kebschull J, Mechó S, Pruna R, Kassarian A, Valle X, Yanguas X, Alomar X, Martinez J, Pomés J, Rodas G. Sports-related lower limb muscle injuries: pattern recognition approach and MRI review. *Insights Imaging*. 2020 Oct 7;11(1):108. doi: 10.1186/s13244-020-00912-4. PMID: 33026534; PMCID: PMC7539263.
- (13) Crema MD, Yamada AF, Guermazi A, Roemer FW, Skaf AY. Imaging techniques for muscle injury in sports medicine and clinical relevance. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2015 Jun;8(2):154-61. doi: 10.1007/s12178-015-9260-4. PMID: 25708212; PMCID: PMC4596169.
- (14) Flores DV, Mejía Gómez C, Estrada-Castrillón M, Smitaman E, Pathria MN. MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance. *Radiographics*. 2018 Jan-Feb;38(1):124-148. doi: 10.1148/rg.2018170072. Epub 2017 Dec 8. PMID: 29220207.
- (15) Rybak LD, Torriani M. Magnetic resonance imaging of sports-related muscle injuries. *Top Magn Reson Imaging*. 2003 Apr;14(2):209-19. doi: 10.1097/00002142-200304000-00008. PMID: 12777891.
- (16) Drews B, Arampatzis A, Bloch W, Hotfiel T, Mauch F, Nührenbörger C, Ueblacker P, Klinische und bildgebende Diagnostik. In: *Muskel- und Sehnenverletzungen: GOTS-Expertenmeeting Burg/Spreewald vom 26.05.- 29.05.2016*. 1. Aufl. Verlags-Comptoir Rolle; 2017.
- (17) Eck BL, Yang M, Elias JJ, Winalski CS, Altahawi F, Subhas N, Li X. Quantitative MRI for Evaluation of Musculoskeletal Disease: Cartilage and Muscle Composition, Joint Inflammation, and Biomechanics in Osteoarthritis. *Invest Radiol*. 2023 Jan 1;58(1):60-75. doi: 10.1097/RLI.0000000000000909. Epub 2022 Sep 13. PMID: 36165880; PMCID: PMC10198374.
- (18) Ekstrand J, Healy JC, Waldén M, Lee JC, English B, Hägglund M. Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play. *Br J Sports Med*. 2012 Feb;46(2):112-7. doi: 10.1136/bjsports-2011-090155. Epub 2011 Dec 5. PMID: 22144005.
- (19) Albes G, Lippek V, Müller B, Weier C. *Facharztprüfung Radiologie*. In: *Teil II Spezielle diagnostische Radiologie: 4 Gehirn 4.3 Intrakranielle Blutungen*. 4. Aufl. Georg Thieme Verlag; 2017.
- (20) Junge, A. & Dvorak, J. (2000). Influence of Definition and Data Collection on the Incidence of Injuries in Football. *The American Journal of Sports Medicine*, 28(5_suppl), 40–46. https://doi.org/10.1177/28.suppl_5.s-40
- (21) Kerkhoffs GMMJ, Servien E. *Acute muscle injuries*. Springer; 2014.
- (22) The Radiology Assistant: MRI traumatic changes [Internet]. 2009. Verfügbar unter: <https://radiologyassistant.nl/musculoskeletal/muscle/mri-traumatic-changes>
- (23) Heiss, R., Janka, R., Uder, M. *et al*. Bildgebung von Muskelverletzungen im Sport. *Radiologie* 63, 249–258 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00117-023-01118-7>

- (24) Kerkhoffs GM, van Es N, Wieldraaijer T, Sierevelt IN, Ekstrand J, van Dijk CN. Diagnosis and prognosis of acute hamstring injuries in athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013 Feb;21(2):500-9. doi: 10.1007/s00167-012-2055-x. Epub 2012 May 24. PMID: 22622781; PMCID: PMC3549245.
- (25) Hallén A, Ekstrand J. Return to play following muscle injuries in professional footballers. *J Sports Sci.* 2014;32(13):1229-36. doi: 10.1080/02640414.2014.905695. Epub 2014 May 1. PMID: 24784885.
- (26) Ekstrand J, Lee JC, Healy JC. MRI findings and return to play in football: a prospective analysis of 255 hamstring injuries in the UEFA Elite Club Injury Study. *Br J Sports Med.* 2016 Jun;50(12):738-43. doi: 10.1136/bjsports-2016-095974. Epub 2016 Apr 15. PMID: 27084882.
- (27) Wangensteen A, Bahr R, Van Linschoten R, Almusa E, Whiteley R, Witvrouw E, Tol JL. MRI appearance does not change in the first 7 days after acute hamstring injury-a prospective study. *Br J Sports Med.* 2017 Jul;51(14):1087-1092. doi: 10.1136/bjsports-2016-096881. Epub 2016 Dec 28. PMID: 28031188.
- (28) Pollock N, James SL, Lee JC, Chakraverty R. British athletics muscle injury classification: a new grading system. *Br J Sports Med.* 2014 Sep;48(18):1347-51. doi: 10.1136/bjsports-2013-093302. Epub 2014 Jul 16. PMID: 25031367.
- (29) Valle X, Alentorn-Geli E, Tol JL, Hamilton B, Garrett WE Jr, Pruna R, Til L, Gutierrez JA, Alomar X, Balius R, Malliaropoulos N, Monllau JC, Whiteley R, Witvrouw E, Samuelsson K, Rodas G. Muscle Injuries in Sports: A New Evidence-Informed and Expert Consensus-Based Classification with Clinical Application. *Sports Med.* 2017 Jul;47(7):1241-1253. doi: 10.1007/s40279-016-0647-1. PMID: 27878524.
- (30) Mueller-Wohlfahrt HW, Haensel L, Mithoefer K, Ekstrand J, English B, McNally S, Orchard J, van Dijk CN, Kerkhoffs GM, Schamasch P, Blottner D, Swaerd L, Goedhart E, Ueblacker P. Terminology and classification of muscle injuries in sport: the Munich consensus statement. *Br J Sports Med.* 2013 Apr;47(6):342-50. doi: 10.1136/bjsports-2012-091448. Epub 2012 Oct 18. PMID: 23080315; PMCID: PMC3607100.
- (31) Ricky Shamji, Steven L J James, Rajesh Botchu, Kent A Khurniawan, Gurjit Bhogal, Alison Rushton - Association of the British Athletic Muscle Injury Classification and anatomic location with return to full training and reinjury following hamstring injury in elite football: *BMJ Open Sport & Exercise Medicine* 2021;7: e001010.
- (32) Fuller CW, Ekstrand J, Junge A, Andersen TE, Bahr R, Dvorak J, Hägglund M, McCrory P, Meeuwisse WH. Consensus statement on injury definitions and data collection procedures in studies of football (soccer) injuries. *Br J Sports Med.* 2006 Mar;40(3):193-201. doi: 10.1136/bjism.2005.025270. PMID: 16505073; PMCID: PMC2491990.

- (33) Pollock N, Patel A, Chakraverty J, Suokas A, James SL, Chakraverty R. Time to return to full training is delayed and recurrence rate is higher in intratendinous ('c') acute hamstring injury in elite track and field athletes: clinical application of the British Athletics Muscle Injury Classification. *Br J Sports Med.* 2016 Mar;50(5):305-10. doi: 10.1136/bjsports-2015-094657. Epub 2015 Jul 17. PMID: 26888072.
- (34) Tears C, Rae G, Hide G, Sinha R, Franklin J, Brand P, Hasan F, Chesterton P. The British Athletics Muscle Injury Classification grading system as a predictor of return to play following hamstrings injury in professional football players. *Phys Ther Sport.* 2022 Nov;58:46-51. doi: 10.1016/j.ptsp.2022.08.002. Epub 2022 Sep 7. PMID: 36148699.
- (35) Hollabaugh WL, Sin A, Walden RL, Weaver JS, Porras LP, LeClere LE, Karpinos AR, Coronado RA, Gregory AJ, Sullivan JP. Outcomes of Activity-Related Lower Extremity Muscle Tears After Application of the British Athletics Muscle Injury Classification: A Systematic Review. *Sports Health.* 2024 Sep-Oct;16(5):783-796. doi: 10.1177/19417381231195529. Epub 2023 Sep 8. PMID: 37681683; PMCID: PMC11346221.
- (36) Reurink G, Goudswaard GJ, Tol JL, Almusa E, Moen MH, Weir A, Verhaar JA, Hamilton B, Maas M. MRI observations at return to play of clinically recovered hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2014 Sep;48(18):1370-6. doi: 10.1136/bjsports-2013-092450. Epub 2013 Nov 19. PMID: 24255767; PMCID: PMC4174122.
- (37) Rudisill SS, Kucharik MP, Varady NH, Martin SD. Evidence-Based Management and Factors Associated With Return to Play After Acute Hamstring Injury in Athletes: A Systematic Review. *Orthop J Sports Med.* 2021 Nov 29;9(11):23259671211053833. doi: 10.1177/23259671211053833. PMID: 34888392; PMCID: PMC8649106.
- (38) Sanfilippo JL, Silder A, Sherry MA, Tuite MJ, Heiderscheit BC. Hamstring strength and morphology progression after return to sport from injury. *Med Sci Sports Exerc.* 2013 Mar;45(3):448-54. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182776eff. PMID: 23059864; PMCID: PMC3580023.
- (39) Silder A, Sherry MA, Sanfilippo J, Tuite MJ, Hetzel SJ, Heiderscheit BC. Clinical and morphological changes following 2 rehabilitation programs for acute hamstring strain injuries: a randomized clinical trial. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2013 May;43(5):284-99. doi: 10.2519/jospt.2013.4452. Epub 2013 Mar 13. PMID: 23485730; PMCID: PMC3751188.
- (40) Mauch F, Drews B, Best R: Bildgebende Verfahren zur Diagnostik von Muskelverletzungen. OUP 2017; 2: 075–081 DOI 10.3238/oup.2017.0075–0081
- (41) Ekstrand J, Askling C, Magnusson H, Mithoefer K. Return to play after thigh muscle injury in elite football players: implementation and validation of the Munich muscle injury classification. *Br J Sports Med.* 2013 Aug;47(12):769-74. doi: 10.1136/bjsports-2012-092092. Epub 2013 May 5. PMID: 23645834; PMCID: PMC3717808.

- (42) Valle X, Mechó S, Alentorn-Geli E, Järvinen TAH, Lempainen L, Pruna R, Monllau JC, Rodas G, Isern-Kebschull J, Ghrairi M, Yanguas X, Balius R, la Torre AM. Return to Play Prediction Accuracy of the MLG-R Classification System for Hamstring Injuries in Football Players: A Machine Learning Approach. *Sports Med.* 2022 Sep;52(9):2271-2282. doi: 10.1007/s40279-022-01672-5. Epub 2022 May 24. PMID: 35610405.
- (43) Fontanier V, Bruchard A, Tremblay M, Mohammed R, da Silva-Oolup S, Suri-Chilana M, Pasquier M, Hachem S, Meyer AL, Honoré M, Vigne G, Bermon S, Murnaghan K, Lemeunier N. Classification of myo-connective tissue injuries for severity grading and return to play prediction: A scoping review. *J Sci Med Sport.* 2025 Jan;28(1):46-55. doi: 10.1016/j.jsams.2024.07.016. Epub 2024 Aug 8. PMID: 39232948.
- (44) Valle X, Mechó S, Pruna R, *et al.* The MLG-R muscle injury classification for hamstrings. examples and guidelines for its use. *Apunts. Medicina de l'Esport* 2019;54:73–9. doi:10.1016/j.apunts.2018.11.002
- (45) Wangensteen A, Almusa E, Boukarroum S, Farooq A, Hamilton B, Whiteley R, Bahr R, Tol JL. MRI does not add value over and above patient history and clinical examination in predicting time to return to sport after acute hamstring injuries: a prospective cohort of 180 male athletes. *Br J Sports Med.* 2015 Dec;49(24):1579-87. doi: 10.1136/bjsports-2015-094892. Epub 2015 Aug 24. PMID: 26305004.
- (46) Hägglund M, Waldén M, Bahr R, Ekstrand J. Methods for epidemiological study of injuries to professional football players: developing the UEFA model. *Br J Sports Med.* 2005 Jun;39(6):340-6. doi: 10.1136/bjism.2005.018267. PMID: 15911603; PMCID: PMC1725241.
- (47) van Heumen M, Tol JL, de Vos RJ, Moen MH, Weir A, Orchard J, Reurink G. The prognostic value of MRI in determining reinjury risk following acute hamstring injury: a systematic review. *Br J Sports Med.* 2017 Sep;51(18):1355-1363. doi: 10.1136/bjsports-2016-096790. Epub 2017 Mar 4. PMID: 28259847.
- (48) Slavotinek JP. Muscle injury: the role of imaging in prognostic assignment and monitoring of muscle repair. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2010 Jun;14(2):194-200. doi: 10.1055/s-0030-1253160. Epub 2010 May 18. PMID: 20486027.
- (49) Isern-Kebschull J, Pedret C, Mechó S, Pruna R, Alomar X, Yanguas X, Valle X, Kassarian A, Martínez J, Tomas X, Rodas G. MRI findings prior to return to play as predictors of reinjury in professional athletes: a novel decision-making tool. *Insights Imaging.* 2022 Dec 27;13(1):203. doi: 10.1186/s13244-022-01341-1. PMID: 36575363; PMCID: PMC9794673.
- (50) Cruz J, Mascarenhas V. Adult thigh muscle injuries-from diagnosis to treatment: what the radiologist should know. *Skeletal Radiol.* 2018 Aug;47(8):1087-1098. doi: 10.1007/s00256-018-2929-1. Epub 2018 Mar 21. PMID: 29564488.

- (51) Ueblacker P, Müller-Wohlfahrt HW, Ekstrand J. Epidemiological and clinical outcome comparison of indirect ('strain') versus direct ('contusion') anterior and posterior thigh muscle injuries in male elite football players: UEFA Elite League study of 2287 thigh injuries (2001-2013). *Br J Sports Med*. 2015 Nov;49(22):1461-5. doi: 10.1136/bjsports-2014-094285. Epub 2015 Mar 9. PMID: 25755277.
- (52) Kumaravel M, Bawa P, Murai N. Magnetic resonance imaging of muscle injury in elite American football players: Predictors for return to play and performance. *Eur J Radiol*. 2018 Nov; 108:155-164. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.09.028. Epub 2018 Sep 27. PMID: 30396649.
- (53) Prakash A, Entwisle T, Schneider M, Brukner P, Connell D. Connective tissue injury in calf muscle tears and return to play: MRI correlation. *Br J Sports Med*. 2018 Jul;52(14):929-933. doi: 10.1136/bjsports-2017-098362. Epub 2017 Oct 26. PMID: 29074478.
- (54) Reurink G, Brilman EG, de Vos RJ, Maas M, Moen MH, Weir A, Goudswaard GJ, Tol JL. Magnetic resonance imaging in acute hamstring injury: can we provide a return to play prognosis? *Sports Med*. 2015 Jan;45(1):133-46. doi: 10.1007/s40279-014-0243-1. PMID: 25119158.
- (55) Zein MI, Reurink G, Suskens JJM, Monte JRC, Smithuis FF, Buckens S, Maas M, Tol JL. 3.0-Tesla MRI Observation at Return to Play After Hamstring Injuries. *Clin J Sport Med*. 2025 Mar 1;35(2):119-126. doi: 10.1097/JSM.0000000000001289. Epub 2024 Nov 20. PMID: 39565178; PMCID: PMC11837960.
- (56) Ekstrand J, Häggglund M, Waldén M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am J Sports Med*. 2011 Jun;39(6):1226-32. doi: 10.1177/0363546510395879. Epub 2011 Feb 18. PMID: 21335353.
- (57) Wangensteen A, Tol JL, Roemer FW, Bahr R, Dijkstra HP, Crema MD, Farooq A, Guermazi A. Intra- and interrater reliability of three different MRI grading and classification systems after acute hamstring injuries. *Eur J Radiol*. 2017 Apr; 89:182-190. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.02.010. Epub 2017 Feb 11. PMID: 28267537.
- (58) CIES Football Observatory. Match Calendar and Player Workload: Players most in-demand – current stand and trends. Neuchâtel (CH): CIES Football Observatory; 2024. Report No.: Summer Series Report 3. Available from: <https://football-observatory.com/-Serie->
- (59) Hood C R Jr. Why using pictures in practice can improve patient adherence. *Podiatry Today*. 2016.
- (60) Ekstrand J. Lessons learned from two decades of injury surveillance in elite football. *Aspetar Sports Med J*. 2019 Mar 27; 8:12–16.
- (61) Uhlig, J., Kroencke, T. & Kim, H.S. Retrospective Clinical Studies in Interventional Oncology: Relevance and Challenges. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2025). <https://doi.org/10.1007/s00270-025-04143-2>

- (62) Mucci B, Murray H, Downie A, Osborne K. Interrater variation in scoring radiological discrepancies. *Br J Radiol.* 2013 Aug;86(1028):20130245. doi: 10.1259/bjr.20130245. Epub 2013 Jul 5. PMID: 23833035; PMCID: PMC3745061.
- (63) Feletti F. Sports Radiology: A Key Driver of Clinical Decision-Making. *Diagnostics (Basel).* 2025 Aug 7;15(15):1977. doi: 10.3390/diagnostics15151977. PMID: 40804941; PMCID: PMC12346329.
- (64) Najjar R. Redefining Radiology: A Review of Artificial Intelligence Integration in Medical Imaging. *Diagnostics (Basel).* 2023 Aug 25;13(17):2760. doi: 10.3390/diagnostics13172760. PMID: 37685300; PMCID: PMC10487271.
- (65) Müller-Rensmann C. MRT-Diagnostik im Sport – Bessere Verfügbarkeit – telemedizinische orthopädisch-radiologische Zusammenarbeit. *Sportärztezeitung* [Internet]. 2022 Apr [zitiert 2025 Aug 18]; Rubrik Therapie. Verfügbar unter: <https://sportaerztezeitung.com/rubriken/therapie/12943/mrt-diagnostik-im-sport/>
- (66) Nelis S, Dijkstra HP, Damman OC, Farooq A, Verhagen E. Shared decision-making with athletes: a survey study of healthcare professionals' perspectives. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2024 Apr 30;10(2): e001913. doi: 10.1136/bmjsem-2024-001913. PMID: 38736642; PMCID: PMC11086382.