

Muskelverletzungen: Diagnostik und Behandlungen

Verletzungen des Skelettmuskels gehören mit 10–55% zu den häufigsten Sportverletzungen überhaupt [7, 22, 32]. Sie können aufgrund von außen einwirkender Gewalt (Traumen) oder durch verschiedene innere Ursachen (Stoffwechsel, Vorschädigung etc.) hervorgerufen werden. Dabei kommt es zu einem Missverhältnis zwischen Belastung und Belastbarkeit, was posttraumatisch innerhalb eines bestimmten Regenerationszeitraums (Stunden bis Wochen) zu einer Funktionseinschränkung der Muskulatur führt.

Der ständig wachsende Leistungsdruck in der Gesellschaft erfordert nicht nur im Sport sondern auch im Arbeits- und Lebensalltag eine schnelle Wiederherstellung der individuellen maximalen Leistungs- und Belastungsfähigkeit. Die Wirksamkeit der zahlreichen bekannten Behandlungsansätze gilt es durch evidenzbasierende kontrollierte Studien zu belegen, um die Therapieoptionen dann schnellstmöglich in die klinische Praxis umsetzen zu können.

Anatomie

Der Skelettmuskel kann einfacherweise in 2 große Komponenten unterteilt werden. Die innervierten kontraktile Myofibrillen des Muskels sind dabei parallel zu dem den Muskel umgebenden Binde- und Stützgewebe angeordnet. Das den gesamten Muskelbauch beinhaltende Epimysium stellt die kräftigste der 3 bindegewebeartigen Mantelstrukturen dar [54]. Das

innerhalb des Muskelbauchs liegende und faszikelbildende Perimysium umfasst etwa 10 bis einige Hundert Muskelfasern. Dabei wird jede einzelne Muskelfaser erneut durch eine weitere hauchdünne Bindegewebschicht umgeben – dem Endomysium.

Das Bindegewebe beinhaltet Blutgefäße und Nerven und verleiht dem Muskel zusätzliche passive Zug- und Druckfestigkeit sowie Stabilitätseigenschaften. Dies unterstützt den Muskel, einzelne Muskelfaserkontraktionen in eine effiziente Lokomotion umzuwandeln.

Die Muskelfasern des Menschen sind bandartige Zellen mit einer stark variierenden Länge (wenige Millimeter beim M. stapedius bis zu 50 cm beim M. sartorius). Ihr Durchmesser beträgt von 15–20 mm bei den äußeren Augenmuskeln eines jeden Menschen bis zu >100 mm einzelner Muskelfasern bei Kraftsportlern.

Über die hauptsächlich via Integrine vermittelte, bis zu 1000 kp Zugspannkraft aufnehmende myotendinöse Verbindung [57, 58] ist jede Myofibrille an beiden Enden an das Bindegewebe einer Sehne bzw. an sehnenartige Faszien angeheftet. Sie ist im weiteren Sinne Bestandteil der extrazellulären Matrix (EZM; [14, 36]).

Verletzungsmechanismen beim Skelettmuskel

Überdehnungen/Zerrungen, Prellungen als auch Schnittverletzungen prägen das Bild der Muskelverletzungen, wobei >90% der Muskelverletzungen im Sport Prellungen und Zerrungen sind und Schnitt-

verletzungen im Sport eher selten vorkommen [22, 32]. Die Sportart „Short-track“ ist dabei führend für letztgenannte. Nimmt man die zeitliche Komponente dazu, lassen sich weiterhin akute und chronische Muskelverletzungen unterscheiden [11].

➤ Überdehnungen/Zerrungen, Prellungen als auch Schnittverletzungen prägen das Bild der Muskelverletzungen

Eine für Kontaktsportarten typische akute Muskelprellung ereignet sich, wenn der Muskel eine plötzliche schwere Kompressionskraft erfährt, Z. B. einen direkten Schlag auf den Muskel. In Sprint- und Sprungsportarten findet man im Gegensatz dazu eher akute Muskelzerrungen, welche oft durch traumatische, plötzlich exzessive oder chronische Überbelastung und Muskeldyskoordination hervorgerufen werden [11, 43]. Meist trifft die zur Überlastung führende, von außen einwirkende Kraft auf einen angespannten in der Länge nachgebenden Muskel (exzentrischer Mechanismus). Eine reine aktive Muskelkontraktion konnte in Tierversuchen weder partielle noch komplette Muskelfaserrisse provozieren [23].

Die Überdehnung der Muskelfasern und schließlich die Ruptur ereignet sich typischerweise nahe der myotendinösen Verbindung. Muskelzerrungen betreffen vornehmlich oberflächige zweigelenkige Muskeln wie M. rectus femoris, M. semitendinosus und M. gastrocnemius [16, 22, 38]. Chronische Muskelverletzungen tre-

Tab. 1 Heilungsphasen des verletzten Skelettmuskels

1. Destruktionsphase	Ruptur mit folgender Muskelfasernekrose, Hämatombildung und Zellentzündungsreaktion
2. Reparaturphase	Phagozytose des nekrotischen Gewebes, Muskelfaserregeneration (-erneuerung) mit begleitender Narbengewebebildung und Kapillareinsprossung in die verletzte Region
3. Remodellingphase	Reifung der erneuerten Muskelfasern, Kontraktion sowie Reorganisation des Narbengewebes und Erholung der Muskelfunktion

ten besonders bei Adoleszenten (30–50% aller sportassoziierten Verletzungen) und bei Ausdauersportlern auf und sind auf repetitiv mikrotraumatische oder chronische Überlastung zurückzuführen [13].

Heilungsprozess

Die Wundheilung des Skelettmuskels ist wie die meisten Heilungsprozesse im menschlichen Körper ein Reparaturprozess, d. h. es entsteht ein verändertes (Narben- bzw. Ersatz-)Gewebe. Ungeachtet des ursächlichen Verletzungsmechanismus läuft die Heilung des verletzten Skelettmuskels im Wesentlichen nach dem folgenden konstanten Schema in 3 teilweise überlappenden Phasen ab (■ **Tab. 1**).

Nach Zerstörung der einzelnen Muskelzellen folgt an der Verletzungsstelle die lokale Nekrose. Die Abdichtung der Verletzungsstelle nach Sakrolemmruptur erfolgt durch lysosomale Vesikel [44] und durch das sog. Kontraktionsband. Eingerissene Blutgefäße schwimmen die im Blut enthaltenen Entzündungszellen direkt in die Verletzungsstelle ein [59]. Stimuliert durch die Verletzung der extrazellulären Matrix kommt es etwas zeitversetzt durch Satelittenzellen zur Sezernierung von lokalen Wundhormonen [14] und zur Freisetzung gebundener lokalständiger Wachstumsfaktoren und Zytokinen. Fibroblastenfaktor (FGF), Insulin-growth-Faktor (IGF), transformierender Wachstumsfaktor β (TGF- β), diverse Interleukine (1 β und 6) und wahrscheinlich auch der Plättchenwachstumsfaktor sind einige dieser. Insgesamt führen sie zu einer Verstärkung der Entzündung [12]. Die eingeschwemmten Monozyten transformieren sich zu proteolytischen und phagozytotischen Makrophagen [21]. Die die nekrotischen Anteile umgebende Basalmembran bleibt als Gerüst für die sich an ihrer Außenseite befindlichen Satelittenzellen bestehen.

Von diesen Satelittenzellen geht die Bildung neuer Muskelfasern aus [29].

Die beiden nach abgelaufener Destruktionsphase beginnenden Prozesse sind die Regeneration von Muskelfasern, Nerven und Blutgefäßen auf der einen Seite und die bindegewebige Narbenbildung auf der anderen Seite. Sie konkurrieren, aber sie unterstützen sich auch [29].

■ Die Basis der Muskelfaserregeneration sind die Satelittenzellen.

Sie bilden neben und unter jeder individuellen Muskelfaser ein Sammelbecken von undifferenzierten Reservezellen. Sie wurden während der embryonalen Entwicklung aufgespart. Proliferationsreize der Satelittenzellen sind neben physiologischen Stimuli wie externer Dehnung und mechanischer Belastung [8] sogar kleinste Muskelverletzungen [1]. Nach Proliferation differenzieren sie sich zu Myoblasten und fusionieren schließlich untereinander zu vielkernigen Myotuben.

Ausgangspunkt für die bindegewebige Narbenbildung ist das Hämatom. Es bildet sich in der durch die Ruptur der Muskelfasern entstandenen Lücke, welche sich mit Fibrin, Fibronektin sowie Entzündungszellen enthaltendem Blut auffüllt. Das innerhalb des ersten Tages durch Quervernetzungen sich organisierende Hämatom gilt als Anheftungsplatz für Fibroblasten [42] sowie als initiale Verstärkung des Wundgewebes. Unter anderem durch die elastischen Eigenschaften des Fibronektins ist somit eine frühzeitige Festigkeit und Stabilität gegeben [33]. Im Laufe der Narbenreifung wird diese Stabilität durch sog. „cross links“ (intramolekulare Querverbindungen) zunächst unter Kollagen-III- und später unter Kollagen-I-Fasern verstärkt. Kurz nach dem Trauma ist die bindegewebige Narbe an der Verletzungsstelle der schwächste Punkt.

Orthopäde 2010 · 39:1098–1107
DOI 10.1007/s00132-010-1693-2
© Springer-Verlag 2010

M. Kieb · O. Lorbach · M. Engelhardt Muskelverletzungen: Diagnostik und Behandlungen

Zusammenfassung

Muskelverletzungen sind häufige Verletzungen im Sport und erfordern aufgrund der heutigen Gesellschaft eine effektive suffiziente Behandlung. Hervorgerufen durch akute oder chronische Überbelastung und fehlende Muskelkoordination handelt es sich dabei hauptsächlich um Prellungen und Zerrungen. Eine rechtzeitige Hämatombegrenzung und adäquate Erstbehandlung sind die Grundpfeiler einer kurzen Verletzungsausfallzeit. Im richtigen Timing zwischen Immobilisation und Remobilisation bzw. Progredienz der Remobilisation besteht der Schlüssel für eine optimierte Therapie. In ausgewählten bzw. schweren Fällen ist eine operative Therapie notwendig. Die Muskelreparatur lässt sich durch bestimmte adjuvante Therapien möglicherweise verkürzen, wobei nicht einzelne Phasen übersprungen, sondern alle physiologischen Wundheilungsphasen durch einen extern induzierten höheren Umsatz beschleunigt durchlaufen werden sollten.

Schlüsselwörter

Muskel · Muskelverletzungen · Sportverletzung · Muskelzerrung · Muskelriss

Muscle injuries: diagnostics and treatments

Abstract

Muscle injuries are common in sports. They are usually caused by either acute (mostly eccentric mechanisms) or chronic overloading with a lack of muscle coordination. They present in clinical practice as bruises and muscle sprains. Due to the rigours of a modern society and the high economic cost of time off work, an effective treatment needs to be employed. The key to an optimised therapy rests in the appropriate timing between immobilisation and mobilisation. The interval to muscle repair might be shortened by certain adjuvant therapies. In doing so, it is important that no physiological phases of wound healing are overlooked. Muscle healing can be accelerated by externally induced higher metabolic turnover. Surgical therapy is sometimes necessary in selected cases and in serious injuries.

Keywords

Muscle · Muscle strain · Sports injuries · Muscle trauma · Muscle rupture

Die kapilläre Einsprossung und die damit assoziierte nervale Einsprossung sind essentiell für die Muskelregeneration. Eine Voraussetzung und gleichzeitig ein erstes Zeichen für eine Regeneration ist das von überlebenden Blutgefäßstümpfen ausgehende Einsprossen von neuen Kapillaren in das Hämatom [30]. Während die jungen Myotuben zu Beginn der Regeneration durchaus unter anaeroben Bedingungen gebildet werden können, ist der aerobe Energielieferungsweg in der finalen Phase grundlegend.

In der Regel ist aufgrund der innerhalb des Muskels liegenden rupturierten Axone der Nerv-Muskel-Kontakt ziemlich schnell wiederhergestellt [60]. Ohne Reinnervation folgt die Atrophie. Entscheidend in Analogie zur Revaskularisierung ist, dass ohne komplette Reinnervation der gesamte Regenerationsprozess zum Stillstand kommen kann, d. h. eine wie auch immer durchgeführte adäquate Revaskularisations- bzw. Reinnervationsförderung ist essentiell für die Regeneration des verletzten Skelettmuskels.

Zwischen erneuerten Muskelfasern im inneren des Hämatoms und der bindegewebigen Narbe im äußeren Teil des Hämatoms bildet sich eine sog. minimyotendinöse Verbindung, welche schließlich mit der eigentlichen myotendinösen Verbindung in Reihe geschaltet ist [34]. Der beidseitige Versuch der neu gebildeten Muskelfasern, sich durch die mechanische Barriere der Narbe Kontakt zu den posttraumatisch verbliebenen Muskelstümpfen zu verschaffen, wird durch die Narbenverkleinerung unterstützt [61]. Unklar ist, ob es zu einer kompletten Wiedervereinigung der Muskelfasern kommt. Entscheidend auch in diesem Zusammenhang ist, dass der Muskel bereits vor seiner kompletten Heilung adäquaten Zug und Druck im aktiven oder passiven Sinne benötigt, um die zunächst vorübergehende laterale und später dann terminale Adhäsion der Myotuben mit der Narbe und höchstwahrscheinlich auch die der Narbe mit den Stümpfen zu vollziehen [34].

Da die Stümpfe unmittelbar posttraumatisch bei jeder Kontraktion weiter auseinandergerissen werden, ist ein rechtzeitiger Trainings- und Gebrauchsstop im Sinne einer schnellen Regeneration nur logisch. Die Bestimmung des genauen

Zeitpunkts des dringend nötigen Belastungsstarts bedarf viel Erfahrung eines Experten und lässt sich gegenwärtig noch nicht objektivieren.

Klinik und Diagnose der Muskelverletzungen

Die Diagnose akuter Muskelverletzungen beginnt mit einer gründlichen Anamnese des Verletzungsereignisses, gefolgt von einer klinischen Untersuchung bestehend aus Inspektion und Palpation der involvierten Muskeln sowie Funktionstests mit und ohne Widerstand.

Oft liegt die typische Anamnese einer Kontusion oder Zerrung vor. Wenn Sie zusammen mit den Hauptsymptomen Schmerz, Schwellung, Funktionsverlust und Hämatom auftritt, ist die Diagnose einfach.

■ Maßgebend für das klinische Bild ist die Größe und Lokalisation des Hämatoms.

Bestimmend dafür sind der Spannungszustand und der Verletzungsmechanismus. Man unterscheidet zwischen Prellungen auf angespannte Muskeln und Prellungen auf entspannte Muskeln. Akute Verletzungen im Sinne eines Prellungsmechanismus, die sich an angespannten Skelettmuskeln ereignen bleiben meist superfiziell. Bei gleichem Mechanismus auf einen unangespannten Muskel wird der gesamte Impaktionsdruck über alle Muskelschichten bis an die Knochenoberfläche übertragen. Schließlich resultiert eine Muskelkompression und -ruptur knochennah in der Tiefe [15, 22, 24].

Typisch für die Lokalisation des Hämatoms ist auch, dass beim Prellungstyp die Muskelruptur an bzw. um die Prellstelle herum erfolgt, während im Gegensatz dazu bei akuten Muskelzerrungen häufig die myotendinösen Verbindungen betroffen sind [22, 24].

Weiterhin für die Hämatomgröße bestimmend ist die posttraumatische Faszienkontinuität. In Abhängigkeit von ihr kommt es durch den Riss der intramuskulären Blutgefäße zu einem intra- oder intermuskulären Hämatom. Die intakte Muskelfaszie begrenzt das Ausmaß des Hämatoms per se, während sich das in-

termuskuläre Hämatom aufgrund der durch Faszienriss fehlenden natürlichen Grenze frei im Interstitium sowie im interfaszialen Raum ausbreitet.

Kleine, tiefe und/oder innerhalb des Muskelbauchs liegende Hämatome (zumeist bei Extremitätenmuskeln) sind klinisch schwerer zu diagnostizieren. Chronisch lokale Muskelverletzungen projizieren sich auf sog. myofasziale Triggerpunkte und werden auch myofasziale Schmerzsyndrome genannt. Sie imponieren eher durch eine oder mehrere kleine Knoten [11]. Es handelt sich dabei um einen schleichenden Beginn der Muskelverletzung, d. h. das Training oder die Belastung kann zunächst noch fortgeführt werden.

Initial wird oft eine Verhärtung und allgemeine Festigkeit der Muskulatur oder ein starker Muskelkater vom Patienten beschrieben. Die Ursache hierfür kann zum einen in einer Ermüdung der jeweiligen Muskulatur oder in einer neurogen bedingten Muskelverhärtung liegen [47]. Aufgrund des längeren Entstehungszeitraums ist in diesem Zusammenhang auch die Diagnose einer Insertionstendopathie nicht selten. Von chronischen Muskelverletzungen besonders betroffen sind die Adduktoren, die ischiokrurale Muskulatur sowie posturale Muskeln wie z. B. M. trapezius descendens, M. scalenus, M. sternocleidomastoideus, M. levator scapulae und M. quadratus lumborum [17].

➤ Im Vergleich scheint das MRT dem Ultraschall in einigen Bereichen überlegen zu sein

Neben der Palpation bieten die bildgebenden Verfahren wie der Ultraschall und die Magnetresonanztomographie (MRT) nützliche Hilfsmittel, die Verletzungen präzise zu verifizieren und zu diagnostizieren [18, 50]. Der Ultraschall ist als die Methode der Wahl bei Muskelverletzungen anzusehen [51], v. a. weil er u. a. sehr günstig, schnell und nicht invasiv durchzuführen ist (■ **Abb. 1**). Statische Bedingungen können genauso wie dynamische Veränderungen dargestellt werden, da auch bei provozierenden Manövern eine Visualisierung erfolgen kann. Der Verlust von normalen Mus-

Hier steht eine Anzeige.



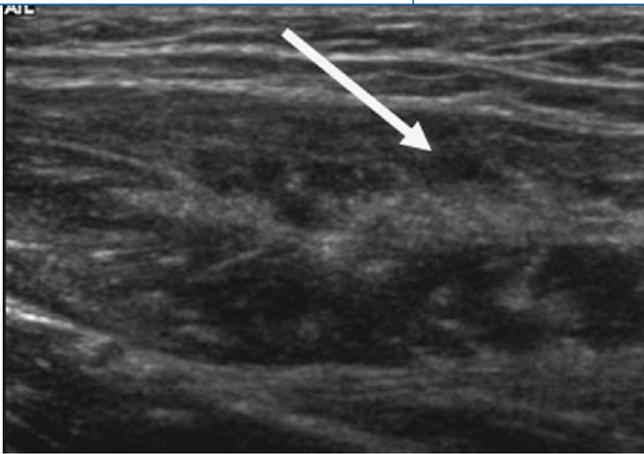


Abb. 1 ◀ Ultraschall multipler kleiner Hämatoome des M. quadriceps femoris. (Quelle: Engelhardt)

kelfasern kann nach den ersten 24 h nach Verletzung visualisiert werden [3, 53]. Allerdings spielt die Erfahrung des Untersuchers eine entscheidende und herausragende Rolle. Daher wird in der Diagnostik der akuten und chronischen Muskelverletzungen zunehmend die MRT eingesetzt, da mit ihrer Hilfe Muskelverletzungen präzise, direkt und mit einer hohen Sensitivität nachgewiesen werden können [11, 49], (▣ **Abb. 2**). Besondere Vorsicht bei der Beurteilung der MRT-Bilder gilt, falls vor der Bildgebung eine Injektionstherapie erfolgt ist. Im Vergleich scheint das MRT dem Ultraschall in einigen Bereichen, wie z. B. der Leistenregion und nahe der myotendinösen Verbindung, überlegen zu sein [18, 32].

Klassifikation der Muskelverletzungen

Es existieren verschiedene Klassifikationen von Muskelverletzungen. Während die Klinik und die Funktion bei der klinischen Klassifikation im Vordergrund steht [20], ist die Einteilung nach Müller-Wohlfahrt [47] deskriptiv bezüglich der strukturellen Schädigung sowie der Kausalität. Eine v. a. hinsichtlich der Therapie und der Klarheit gegenüber dem Patienten sinnvolle Gegenüberstellung ist aus ▣ **Tab. 2** ersichtlich.

Die chronischen Muskelverletzungen und/oder Verhärtungen werden in den meisten Klassifikationen nicht direkt repräsentiert. Man könnte jedoch einen Grad 1b nach Müller-Wohlfahrt als chronische Muskelverletzung ansehen.

Akutbehandlung

Die einfache und praxisnahe Sofortbehandlung des verletzten Skelettmuskels bzw. jeder Art von Weichteilverletzung ist als „PECH-Prinzip“ (Pause, Eis, Kompression und Hochlagerung) bekannt. All diese Maßnahmen haben gemeinsam zum Ziel, die Einblutung in die Verletzungsstelle zu minimieren. Die Wirksamkeit der einzelnen Komponenten des Prinzips konnten, wenn auch nur in experimentellen Studien, nachgewiesen werden [9, 10]. Eine randomisierte klinische Studie in der Gesamtheit des PECH-Prinzips existiert nach EBM-Kriterien nicht.

Das Hauptproblem in der Praxis besteht in der konsequenten Umsetzung des Prinzips. Die Diskrepanz zwischen stetig steigenden sportlichen Ansprüchen in der Gesellschaft und dem meist am Unfallort Nichtvorhandensein von einfachstem Material für die Behandlung sowie geschultem Personal (Trainer, Betreuer) insbesondere im Nachwuchssport erschweren eine optimale Behandlung vieler Weichteilverletzungen im Sport.

Ein essentieller Bestandteil der unmittelbaren Therapie nach Verletzungsereignis ist v. a. bei Leistungssportlern die Kontrolle und Regulation der Psyche. Der Anspruch eines Spitzensportlers an sich selbst ist hoch. Eine Verletzung welchen Ausmaßes auch immer ist konsequent immer mit einem Trainingsausfall sowie oft mit einem Verlust der hart erkämpften körperlichen Leistungsfähigkeit einhergehend. Der Sportler ist sich dessen oft sofort beim Eintreten der Verletzung bewusst. Diese psychische Stresskomponente, welche einen bezüglich der Heilung

kontraproduktiven Anstieg der sympathischen Stresshormone im Blut zur Folge hat, gilt es gezielt zu reduzieren. Dabei sind je nach Athlet Maßnahmen von klassischer Massage über psychische Entspannungsverfahren wie autogenes Training und Meditation bis hin zu intensiver Pflege der sozialen Kontakte (Kinobesuch, Freunde treffen etc.) angezeigt.

Konsequente Immobilisation in dieser Phase soll die Retraktion der zerrissenen Muskelstümpfe [32] und damit genauso wie die Kryotherapie [19, 52] die Zunahme des Hämatoms verhindern. Eis wird in Kombination mit Kompression repetitiv mit einer jeweiligen Dauer von 15–20 min in der ersten Stunde nach Verletzung empfohlen. Die Dauer und Intensität der Kompressionsbehandlung und der damit verbundenen intramuskulären Blutflussverringerung über die 60-min-Grenze hinaus wird in der Literatur diskutiert [15, 55]. Diese sollte mit konstanter, aber nur moderater Kälte erfolgen. Nur dann kann das Ziel der Verminderung der intramuskulären Temperatur von 3–7°C und einen um 50% verringerten Blutfluss erreicht werden [55, 56]. Im Fall massiver Kälteapplikation können oft nicht nur Erfrierungen, sondern auch eine reaktive Hyperämie beobachtet werden. Letztendlich bleibt das biochemische und physiologische Grundprinzip für kurzzeitige Kaltwassereintauchungen und damit auch Kühlung nach Verletzung in der sportlichen Genesung unklar [10].

Additiv sollte eine Hochlagerung der verletzten Extremität im Sinne hydrostatischer, physiologischer und traumatologischer Grundprinzipien gerade in der Pausenphase erfolgen.

Immobilisation und Remobilisation

Unter dem Nimbus der viel zitierten Frühmobilisation hat sich in der Praxis gezeigt, dass die Immobilisation der Patienten und besonders der Sportler im Verhältnis zu dem physiologischen Bedarf zu „locker“ gehandhabt wird. Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass auch minimale Benutzung der Muskulatur direkt nach Trauma in einer größeren Bindegewebe narbe endet, welche bis zu einem unüberwindbaren Hindernis für die op-

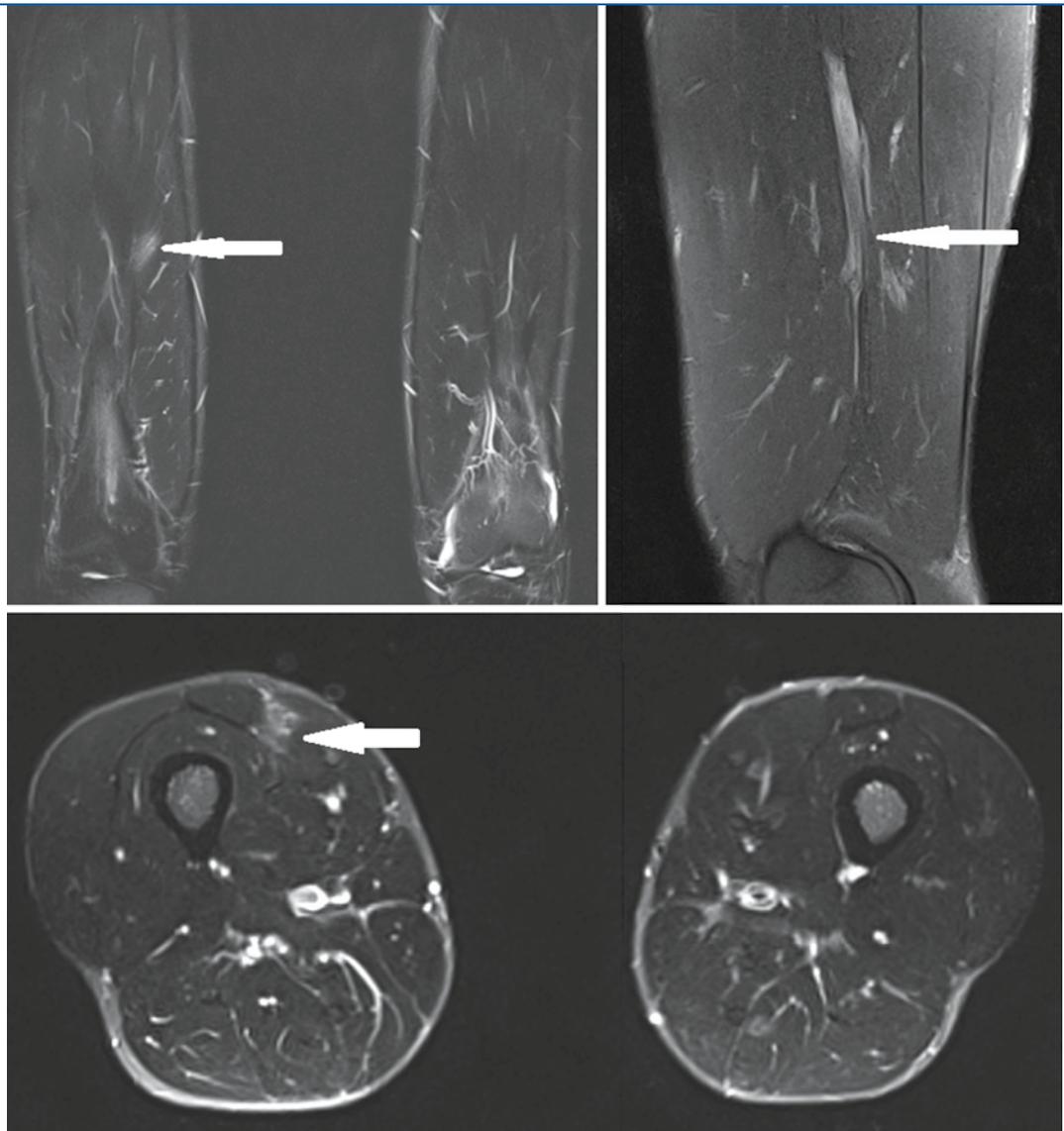


Abb. 2 ▶ MRT eines intermuskulären Hämatoms zwischen Vastus medialis und Vastus intermedius des M. quadriceps femoris. (Quelle: Kieb)

timale Skelettmuskelregeneration werden kann. Die Inzidenz von Rupturen steigt in diesen Fällen [30, 41]. Exzessive Narbenbildung sowie Rupturen können im Rattenmodell durch strikte Gipsbehandlung während der ersten Tage sogar vermieden werden [39, 41]. Ziel der Immobilisation ist, dass das frische Granulationsgewebe (Narbengewebe) eine gewisse Festigkeit erreicht und sich mit den verletzten Muskelstümpfen verbindet.

Im Gegensatz dazu sehen Järvinen et al. [34] eine Immobilisation mittels festen adhäsiven Tapings über dem Muskel oder ähnliches als ausreichend, während in Analogie zu neueren, erneut restriktiveren Therapien eine strikte Immobilisation mittels funktioneller oder konventioneller Casts kurz und mittelfristig bessere Heilungsergebnisse zeigt [40].

Darüber hinaus hat die Frühmobilisation eine zeitige und intensive Einsprossung der Kapillaren in die verletzte Region, eine bessere Regeneration der Muskelfasern und eine bessere Organisation der Muskelfasern induziert als eine Immobilisation [30]. Zusätzlich werden im Vergleich zu langer posttraumatischer Immobilisation die biomechanischen Eigenschaften durch aktive Mobilisierung eines verletzten Skelettmuskels schneller wieder auf das Niveau eines unverletzten Muskels gehoben [30]. Die Muskelfaserregeneration findet relativ zeitig im Heilungsprozess statt. Normalerweise beginnt sie 3–5 Tage nach der Verletzung mit einer Spitze um die 2. Woche [27, 28].

Da die oben beschriebenen mechanischen Reize für die Aktivierung und Ausrichtung der verschiedenen Zellen

und Gewebe benötigt werden und nach 10 Tagen post Trauma die Spannfestigkeit der Narbe größer ist, als die des muskulären Gewebes [37], so ist nach dem derzeitigen Wissensstand der Literatur die Zeit zwischen 5–10 Tagen der Übergangsbereich zwischen Immobilisation und Mobilisation [30, 41]. In dieser Zeit empfiehlt sich ein fester adhäsiver Tapeverband zur Unterstützung der eher passiv wirkenden Bindegewebehüllen (■ **Abb. 3**).

Um die vielfach beschriebenen Effekte der Immobilisation wie Inaktivitätstrophie und intramuskuläre Bindegewebeablagerung zu vermeiden, als auch die beschriebenen Vorteile der (Mobilisation) muskulärer, mechanischer Beanspruchung und externer Dehnung zu addieren, gilt es, den richtigen Zeitpunkt für den Beginn der Mobilisation heraus-

Tab. 2 Gegenüberstellung der Klassifikationen von Muskelverletzungen (modifiziert)

Definition	Grad 1a	Grad 1b	Grad 2	Grad 3a	Grad 3b	Grad 4
Müller-Wohlfahrt	Schmerzhafte Muskelerhärtung, ermüdungsbedingt	Schmerzhafte Muskelhärtung, neurogen (Muskelkontusion)	Muskelzerrung	Muskelfaserriss	Muskelbündelriss	Muskelriss
Klinische Definition	(Grad 0) Fortsetzung der Bewegung möglich, minimale Kraftminderung	Grad 1 (mild)	Grad I (mild)	Grad II (moderat)	Grad III (schwer)	
	Muskelzerrung/Prellung (Riss einiger Muskelfasern)			Riss mehrerer Muskelfasern	Muskelriss	

zufinden. Die spezifische Abstimmung im Einzelfall liegt bei den behandelnden Ärzten und Therapeuten. Es ist in jedem Fall wichtig, dass das Hämatom bzw. das folgende frische Granulationsgewebe zunächst eine gewisse Festigkeit erreicht, bevor die Frühmobilisation mit all ihren positiven Effekten erfolgen sollte.

Die Autoren favorisieren folgenden Verfahrensweg für Athleten mit Muskelverletzungen: strikte Immobilisation mittels funktioneller Casts/neuer Kunststoffgipse für 4–6 Tage, sowie die Benutzung von Unterarmstützen bei Verletzungen der unteren Extremität. Für Regionen wie z. B. die Leistenengegend, wo eine Ruhigstellung schwer fällt [38], gilt es, den Patienten zum vorsichtigen Bewegen zu instruieren. Nach Abnahme des Casts sollte man nach passiver Mobilisation zügig in ein schrittweises schmerzadaptiertes, aktives Training der verletzten Muskulatur übergehen.

Für die ersten 2 Tage ist neben Gesamtreduzierung der „activity of daily living“ (ADL) eine psychische Entspannung mittels Parasympathikusaktivierung von großem Wert. Ab dem 3. Tag post Trauma sollte für eine optimale Regeneration aktives und passives Training unter Schonung der verletzten Struktur hinzukommen. Ab diesem Zeitpunkt ist die Applikation von sensomotorischem Training und neuromuskulären Overflow-Techniken je nach Lokalisation des verletzten Muskels denkbar. Bei Letzterem wird die kontralaterale unverletzte Seite isoliert beübt und dadurch eine nervale Stimulation der betroffenen Seite hervorgerufen.

Muskelverletzungen 1. Grades sollten initial mit einem funktionellen Tape versorgt werden. Aufgrund des anzunehmenden größeren Strukturerhalts der Membranen und daraus resultierender

größerer autogener Abstützungen und der eher uneinheitlichen Hämatomlücke scheint hier eine absolute Immobilisation nicht notwendig zu sein.

Ab Verletzungsgrad 2 sollte das Schema komplett eingehalten werden. Die Applikation von Wachstumsfaktoren und Inhibitoren führen möglicherweise zu einer Beschleunigung der Wundheilung.

Wenn eine möglichst schnelle Wiedereingliederung in den Spitzensport zwingend notwendig ist, kann im Einzelfall über eine zeitliche Kompression des gesamten Schemas inklusive einer früheren Mobilisation diskutiert werden.

Mobilisationsbehandlung

Für das stufenweise schmerzadaptierte aktive Training des verletzten Muskels kann man sich an folgenden spezifischen Behandlungsmethoden orientieren:

1. Schmerzfreiheit ist die Voraussetzung für jegliche Art der Anforderungs- und Trainingsprogression. Mit Einhaltung entsprechender Therapiepausen und in Abhängigkeit vom jeweiligen Patienten kann ein Schmerz von 1 bis maximal 2 auf der numerischen Analogskala von 0–10 toleriert werden.
2. Kokontraktionstraining (d. h. gleichzeitige Anspannung von Agonist und Antagonist) mit ansteigender Belastung bzw. Körpergewichtsübernahme ist nicht nur wegen der Kraftverteilung, sondern auch wegen des gleichzeitigen sensomotorischen Trainings von Vorteil (■ **Abb. 4**).
3. Isometrisches Training (d. h. Muskelanspannungen verschiedener Spannungsstärken bei gleich bleibender Muskellänge) sollte zunächst ohne Belastung/Widerstand und später mit ansteigenden Belastungen durchgeführt werden.

4. Isotonisches Training (d. h. gleichbleibende Muskelanspannung unter Bewegung im Sinne einer Muskel-längenänderung) sollte begonnen werden, wenn isometrisches Training schmerzfrei und mit Widerstand bzw. annähernd Körpergewicht absolviert werden kann. Hierbei ist die Beachtung der individuellen Drehmomentskurven der einzelnen Muskeln für die Rerupturprophylaxe von besonderer Bedeutung. Weiterhin ist es aufgrund des unterschiedlichen Anforderungsprofils an die Muskulatur wichtig, das Prinzip Konzentrik vor Exzentrik weitestgehend einzuhalten. In Analogie zum isometrischen Training sollten isotonische Übungen zuerst ohne Belastung/Widerstand und dann progressiv durchgeführt werden.
5. Isokinetisches, dynamisches Training mit minimaler Belastung sollte dann angefangen werden, wenn die beiden oben erwähnten Übungen schmerzfrei ausgeführt werden können.

Innerhalb der rehabilitativen Maßnahmen sollte die Erwärmung des verletzten Muskels nicht vergessen werden, da dies u. a. die Widerstandsfähigkeit bei Belastung erhöht [39, 41]. Eine stufenweise schmerzfreie Dehnung ist sowohl hinsichtlich einem Entgegenwirken der Narbenretraktion als auch der Senkung der Rerupturrate essentiell [41].

Nach ca. 5 Tagen sollte eine deutliche Besserung der Symptome eingetreten sein. Mit einer Grad-1-Verletzung sollte danach ein normales ausdauerorientiertes Training ohne Spitzenbelastungen wieder möglich sein, wobei eine Grad-2-Verletzung zu diesem Zeitpunkt lediglich mit einer Besserung einhergeht. Konstante Beschwerden zu diesem Zeitpunkt können auf ein intramuskuläres Hämatom oder

eine extensive Gewebsverletzung hindeuten. Unter Beachtung des Kontraktionsstatus sollte erneut eine gründliche klinische Reexamination durchgeführt werden. Der Einsatz des MRT zu diesem Zeitpunkt ist besonders sinnvoll. Auch ein vom selben Untersucher durchgeführter Ultraschall als Verlaufskontrolle ist empfehlenswert [49].

Bei noch bestehender Fluktuation im Verletzungsgebiet kann eine Aspiration oder Punktion erwogen werden. Diese kann auch in Abhängigkeit vom Fall sofort nach der Verletzung erfolgen.

Konservative Therapie vs. operative Therapie

Die meisten Muskelverletzungen mit gut durchgeführter nichtoperativer Therapie führen zu guten Ergebnissen. Deshalb hat das Leitprinzip der Muskeltherapie „Muskelverletzungen heilen konservativ“ durchaus seine Berechtigung. Trotzdem gibt es einige spezifische Indikationen für eine chirurgische Intervention:

- große intramuskuläre Hämatome,
- Muskelrisse >50% bis komplette Muskelzerreißen,
- Myositis ossificans.

Die operative Therapie sollte bei hochgradigen Muskelverletzungen ernsthaft in Erwägung gezogen werden. Ausgedehnte intramuskuläre Hämatome, komplette Zerreißen eines Muskels sowie Muskelrisse, bei denen mehr als die Hälfte des Muskels betroffen ist, stellen gute Operationsindikationen dar [4, 20, 38]. Nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, dass die Erfolgsraten nach Operation akuter Verletzungen bei hoher Patientenzufriedenheit und hervorragender Wiederherstellung der Muskelkraft gut sind, sollte der Entschluss zur operativen Intervention rechtzeitig erfolgen [47]. Neben großer Hämatomausdehnung und sehnennaher Verletzungslökalisation erhärten über den 10. Tag hinaus persistierende Beschwerden trotz adäquater Immobilisation die Indikation zur zeitnahen Operation. Bei ausgedehnten Hämatomen kann auch bereits früher deren Ausräumung sowie die komplette Entfernung des nekrotischen Gewebes erfolgen.



Abb. 3 ▲ Tapeverband an 5. Tag bei einer Muskelverletzung Grad II (klinisch) und Grad 3a nach Müller-Wohlfahrt (Foto: Kieβ)



Abb. 4 ▲ Sensorimotorisches Training im fortgeschrittenen Stadium (ca. 6 Wochen nach Grad-2-Verletzung). (Foto: Kieβ)

Der Vorteil einer Operation bei massiven Muskelbündelrissen liegt in einer früheren Mobilisation

Der Vorteil einer Operation bei massiven Muskelbündelrissen liegt, im Vergleich zu einer Immobilisation, in einer früheren Mobilisation. Hierdurch können sowohl die Dehnungseigenschaften der Muskeln erhalten werden, als auch verbesserte Wiederherstellung der Kontraktionskraft erreicht werden [32, 46]. Zumeist sind große Kräfte besonders für höhergradige operationsrelevante Muskelverletzungen nötig. Daher sind besonders die untere Extremität mit dem M. quadriceps femoris, der ischiokruralen Muskulatur und dem M. gastrocnemius betroffen.

Bei dem operativen Vorgehen von chronischen Verletzungen steht neben der Wiederherstellung der Muskelfaserkontinuität auch die Mobilisation von Narbenadhäsionen im Vordergrund. Letztere äußert sich oft u. a. durch über 4–6 Monate bestehende Schmerzen und einem damit assoziierten Extensionsdefizit. Im Vergleich zu Operationen akuter Verletzungen zeigt die operative Intervention chronischer Verletzungen trotz signifikanter Verbesserungen keine zufriedenstellenden Resultate [48].

Der M. quadriceps femoris ist durch den seriellen Sprint- und additiven Schussvorgang beim Fußballer besonders häufig betroffen. Die sehr seltene Operationsindikation ergibt sich bei persistierender Schmerzsymptomatik und stark eingeschränkter Sportfähigkeit. Studienergebnisse hierzu sind nicht vorhanden. Generell besteht hierzu ein geringer Erfahrungsschatz [47]. Am ehesten spricht für eine operative Versorgung im Bereich des M. quadriceps femoris eine proximale Verletzung des M. rectus femoris und dabei besonders des Caput flexorum. Sein weit in den Muskelbauch reichender sehniger Charakter mit Ursprung am superioren Rand des anterolateralen Acetabulum ermöglicht eine gute Refixationsmöglichkeit [25]. Hinzu kommt die profunde Lage, welche den Zugangsweg für diverse konservative Maßnahmen erschwert. Je proximaler das Caput flexorum betroffen ist, desto eher sollte die Operationsindikation gestellt werden, da in einer Ultraschallstudie längere Heilungsverläufe im Vergleich zu distaleren Verletzungslökalisationen gezeigt werden konnten [6]. Der breite und flache zweite Kopf des M. rectus femoris, das Caput rectum, ist dagegen seltener betroffen.

Der Verletzung der ischiokruralen Muskulatur geht in den meisten Fällen eine zusätzlich zur aktiven Muskelkontraktion einwirkende Kraft in einer „Langsitz-



Abb. 5 ▲ Beispiel für eine Orthese in der Phase der Wiederaufnahme des sportspezifischen Trainings und Wettkampfes nach einer Muskelverletzung des M. soleus. (Foto: Kieb)

postion“ voraus, sei es ein gegnerischer Sprung auf den Rücken eines mit ausgestreckten Beinen am Boden sitzenden American Footballers oder das plötzliche Anfahren des Motorboots beim Wasserski. Häufig sind dabei distale und proximale sehnige Aus- und Abrissverletzungen. Als operative Behandlungsoptionen kommen hierfür die Exstirpation, und transossäre Naht- oder Fadenankerrefixationen in Frage [47]. Die Verletzung im Bereich der myotendinösen Verbindung als typische Muskelverletzung tritt besonders durch maximale Dehnung und die gleichzeitige Abbremsung der Hüftflexion und Knieextension bei Sprintern und Hürdenläufern auf. Es gelten die allgemeinen Grundsätze der Nahtversorgung von Muskelverletzungen. Abhängig vom Befund wird hier jedoch ein konservatives Vorgehen bevorzugt.

Eine Kombination aus resorbierbaren fortlaufenden Nähten und einer modifizierten Mason-Allen-Nahttechnik zeigten in einer biomechanischen Kadaverstudie überlegene Vorteile gegenüber einer konventionellen Naht [47]. Diese lose adaptierenden aber zugresistenten Schlingennähte der Muskelstümpfe sind dennoch möglich, da die aus der geringeren Belastbarkeit resultierende restriktivere Nachbehandlung zusätzlich weniger lokale Reizerscheinungen hervorrufen können. Die Nähte sollten nur dann erfolgen, wenn diese an der den Muskel überziehenden Faszie fixiert werden können. Aufgrund der zunehmenden Faszienstärke sind diese umso erfolgversprechender, je näher sie an der myotendinösen Verbindung liegen. Aufgrund der Gewebebeschaffenheit des Muskels (v. a. in der Mitte des Muskelbauchs)

führen alle weiteren Nahtversuche u. U. zu einer weiteren Gewebeerstörung.

➤ Faszien mehrköpfiger Muskeln sollten nach Möglichkeit jeweils isoliert genäht werden

Faszien mehrköpfiger Muskeln sollten nach Möglichkeit (z. B. M. gastrocnemius) jeweils isoliert genäht werden. Verschiedene Ansätze der postoperativen Ruhigstellung von Muskeln in verkürzter oder gedehnter Position endeten schließlich in altbekannter Neutralposition [31].

Das von uns vorgeschlagene postoperative Behandlungsschema ist angelehnt an Järvinen et al. [35] und lautet wie folgt: Zunächst erfolgt nach einer standardisierten, konsequenten Kompressionsbehandlung und Hochlagerung eine Orthesenruhistellung in Neutralposition. Die Dauer der Immobilisation hängt von der Schwere des Traumas ab. Es folgt eine stufenweise, schmerzadaptierte Aufbelastung postoperativ. Aufgrund der starken Verkürzungstendenz von Muskeln ist nach Ablauf von 2 Wochen postoperativ der Beginn einer vorsichtigen Dehnung innerhalb moderater Schmerzgrenzen sinnvoll.

Bekannte und neue konservative Therapien

Ein kurzzeitiger Einsatz von NSAR (nicht-steroidale Antirheumatika) innerhalb der ersten 5–7 Tage nach Verletzung zeigt überwiegend positive Ergebnisse [45]. Jedoch sollten stets die unerwünschten Arzneimittelwirkungen wie Hypertonie, Veränderung der Nierenfunktion, peptische Ulzerationen und eine erhöhte Herzinfarktrate Beachtung finden. Trotz der großen entzündungshemmenden Wirkung sind Glukokortikoide u. a. aufgrund von Reduktion der biomechanischen Stärke sowie der verzögerten Elimination des Hämatoms i. Allg. nicht indiziert [53].

Wachstumsfaktoren, Stammzellen und Gentherapie sind aufgrund der vielversprechenden Ansätze neben der bisherigen frühfunktionellen Behandlung in den Mittelpunkt der Skelettmuskeltherapie gerückt. Wachstumsfaktoren und Zytokine sind die potentesten mitogenetischen Aktivatoren für viele Zellen, z. B. auch MPC-Zellen (myogene Vorläuferzel-

len [8]). Sie befinden sich u. a./v. a. in den Blutplättchen und werden durch die Zerreißung der Blutgefäße direkt in die Verletzungsstelle eingeschwemmt und durch Kontakt exprimiert.

Die meisten existierenden Studien sind allerdings Evidenzniveau-4-Studien. Ihre geringe Aussagekraft resultiert aus der Verwendung von nichtstandardisierten Methoden, der fehlenden Kontrollgruppe oder der sehr geringen Fallzahl, welche bis hin zu Einzelberichten führt. Eines der wenig existierenden Behandlungsschemata am Gastrocnemiusmodell schlägt eine Trippleapplikation von Wachstumsfaktoren von 2, 24 und 48 h nach der Verletzung vor. Dies ergab eine akzellerierte Satellitenzellaktivierung sowie eine Diametervergrößerung von regenerierten Muskelfasern [63].

Rückkehr zum sportspezifischen Training

Die Entscheidung zur Wiederaufnahme des sportspezifischen Trainings wird entsprechend der Sportlermentalität oft zu zeitig getroffen. Zwei einfache, günstige Methoden erleichtern das richtige Timing:

- die Fähigkeit des verletzten Muskels, ihn genauso zu dehnen wie den Gesunden der kontralateralen Seite,
- die schmerzfreie Benutzung des verletzten Muskels bei einfachen Bewegungen.

Sind diese beiden Voraussetzungen gegeben, so kann die Freigabe für den stufenweisen Wiedereinstieg in das sportspezifische Training gegeben werden [38]. Supervision durch Trainer oder Betreuer innerhalb der ersten Wochen nach Verletzung könnte die Gefahr der Ruptur reduzieren (▣ Abb. 5).

Komplikationen

Neben der Gefahr der Heilungsverzögerung (Minirupturen und Rupturen) durch zu schnelle Belastungsprogression existiert mit der Myositis ossificans traumatica eine gravierende Komplikation bei Weichteiltraumen. Myositis ossificans ist eine nicht neoplastische Pro-

liferation von Knochen und Knorpel innerhalb des Skelettmuskels. An diese seltene Komplikation sollte man besonders bei größeren Traumata, wiederholter kleinerer Traumata, sistierender konservativer Therapieerfolge und bei persistierenden Schmerzen 10–14 Tage nach Skelettmuskelverletzung denken.

Hochkontaktsportarten ohne Schutzvorrichtungen (z. B. Rugby) zeigen ein gehäuftes Auftreten. Eine effiziente radiologische Diagnose gelingt erst spät. Prävention von Muskelverletzungen, gut ausgeführte Erstbehandlung sowie der Einsatz von Indomethacin verringern das Risiko. Als Ultima ratio kann nach Rückbildung der erhöhten alkalischen Phosphatase und bei normalisiertem szintigraphischen Befund die chirurgische Exzision vorgenommen werden [20].

Prävention

Zur Prävention von Muskelverletzungen ist ein gezieltes Krafttraining effektiv. Es dient Muskeldysbalancen auszugleichen [5]. Besonders geeignet hierfür sind die sog. „core exercises“ bzw. der sog. „Stabi-Kreis“. Dabei werden die jeweiligen Muskelketten unter besonderer Betonung der Rumpfmuskulatur nur unter Einsatz des eigenen Körpergewichts trainiert. Die dadurch erzielte erhöhte koordinative und muskuläre Stabilität der Lenden-Becken-Hüftregion (LWS, ISG, iliolumbale Bänder) beugt besonders Typ-Ib-Muskelverletzungen nach Müller-Wohlfahrt vor [2, 26, 62]. Eine Komplettierung des muskulären Anforderungsprofils bei Sportarten mit Ausdauer- bzw. Laufcharakter wird durch den überwiegend isometrischen Charakter der Übungen erreicht. Der essentielle aktive Stützapparat wird hiermit entscheidend gestärkt. Eine Validierung der sich oft im sportspezifischen Training entwickelnden muskulären Dysbalancen sollte regelmäßig durch sowohl isometrische als auch isokinetische apparative Messsysteme erfolgen.

Fazit für die Praxis

- Muskelverletzungen heilen in der Regel relativ schnell und gut und sind bei der Allgemeinbevölkerung ledig-

lich mit kurzer Immobilisation und/oder Taping zu behandeln.

- Bei ambitionierten Sportlern und Hochleistungssportlern hingegen ist jedoch eine hochdifferenzierte Therapie mit zunächst im Vordergrund stehender Perakutbehandlung für den weiteren sportlichen Erfolg essentiell.
- Die Behandlung von Muskelverletzungen bei Sportlern mit >10 Trainingsstunden/Woche sowie bei Nachwuchsathleten sollte durch einen Experten erfolgen, da eine Fehlbehandlung nicht selten zu einem vorzeitigen Karriereabbruch führen kann.

Korrespondenzadresse

PD. Dr. M. Engelhardt

Klinik für Orthopädie, Unfall- und Handchirurgie, Klinikum Osnabrück
Am Finkenbühl 1, 49076 Osnabrück
martin.engelhardt@klinikum-os.de

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur (Auswahl)

1. Äärimaa V, Rantanen J, Best T et al (2004) Mild eccentric stretch injury in skeletal muscle causes transient effects on tensile load and cell proliferation. *Scand J Med Sci Sports* 14(6):367–372
2. Akuthota V, Ferreiro A, Moore T et al (2008) Core stability exercise principles. *Curr Sports Med Rep* 7(1):39–44
3. Allen GM, Wilson DJ (2007) Ultrasound in sports medicine – a critical evaluation. *Eur J Radiol* 62(1):79–85
5. Arnason A, Gudmundsson A, Dahl HA et al (2008) Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scand J Med Sci Sports* 18(1):40–48
6. Balias R, Maestro A, Pedret C et al (2009) Central aponeurosis tears of the rectus femoris: practical sonographic prognosis. *Br J Sports Med* 43(11):818–824
7. Beiner JM, Jokl P (2001) Muscle contusion injuries: current treatment options. *J Am Acad Orthop Surg* 9(4):227–237
10. Bleakley CM, Davison GW (2010) What is the biochemical and physiological rationale for using cold-water immersion in sports recovery? A systematic review. *Br J Sports Med* 44(3):179–187
11. Borg-Stein J, Zaremski JL, Hanford MA (2009) New concepts in the assessment and treatment of regional musculoskeletal pain and sports injury. *PM R* 1(8):744–754
14. Chargé SBP, Rudnicki MA (2004) Cellular and molecular regulation of muscle regeneration. *Physiol Rev* 84(1):209–238
17. Curatolo M, Arendt-Nielsen L, Petersen-Felix S (2006) Central hypersensitivity in chronic pain: mechanisms and clinical implications. *Phys Med Rehabil Clin North Am* 17(2):287–302
20. Engelhardt M (2006) Sportverletzungen – Diagnose, Management und Begleitmaßnahmen. Elsevier –Urban & Fischer, München

23. Garrett WE Jr (1990) Muscle strain injuries: clinical and basic aspects. *Med Sci Sports Exerc* 22(4):436–443
26. Hibbs AE, Thompson K, French D et al (2008) Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports Med* 38(12):995–1008
27. Hoffmann A, Gross G (2009) Innovative strategies for treatment of soft tissue injuries in human and animal athletes. *Med Sport Sci* 54:150–165
28. Hoffmann A, Gross G (2006) Tendon and ligament engineering: from cell biology to in vivo application. *Regen Med* 1(4):563–574
34. Järvinen TAH, Järvinen TL, Kääriäinen M et al (2007) Muscle injuries: optimising recovery. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 21(2):317–331
35. Järvinen TAH, Järvinen TLN, Kääriäinen M et al (2005) Muscle injuries: biology and treatment. *Am J Sports Med* 33(5):745–764
37. Kääriäinen M, Kääriäinen J, Järvinen TLN et al (2000) Integrin and dystrophin associated adhesion protein complexes during regeneration of shearing-type muscle injury. *Neuromuscul Disord* 10(2):121–132
42. Li Y, Huard J (2002) Differentiation of muscle-derived cells into myofibroblasts in injured skeletal muscle. *Am J Pathol* 161(3):895–907
45. Mehallo CJ, Drezner JA, Bytowski JR (2006) Practical management: nonsteroidal antiinflammatory drug (NSAID) use in athletic injuries. *Clin J Sport Med* 16(2):170–174
46. Menetrey J, Kasemkijwattana C, Fu FH et al (1999) Suturing versus immobilization of a muscle laceration. A morphological and functional study in a mouse model. *Am J Sports Med* 27(2):222–229
47. Mueller-Wohlfahrt HW, Uebliacker P, Haensel L (2010) Muskelverletzungen im Sport. Thieme, Stuttgart
49. Shelly MJ, Hodnett PA, MacMahon PJ et al (2009) MR imaging of muscle injury. *Magn Reson Imaging Clin North Am* 17(4):757–773
51. Smith J, Finnoff JT (2009) Diagnostic and interventional musculoskeletal ultrasound: part 1. Fundamentals. *PM R* 1(1):64–75
53. Stević R, Masulović D (2009) Ultrasound diagnostics of muscle and tendon injuries. *Srp Arh Celok Lek* 137(11–12):647–652
54. Takala TE, Virtanen P (2000) Biochemical composition of muscle extracellular matrix: the effect of loading. *Scand J Med Sci Sports* 10(6):321–325
55. Thorsson O, Hemdal B, Lilja B, Westlin N (1987) The effect of external pressure on intramuscular blood flow at rest and after running. *Med Sci Sports Exerc* 19(5):469–473
57. Tidball JG (1991) Force transmission across muscle cell membranes. *J Biomech* 24(Suppl 1): 43–52
62. Willardson JM (2007) Core stability training: applications to sports conditioning programs. *J Strength Cond Res* 21(3):979–985
63. Wright-Carpenter T, Opolon P, Appell HJ et al (2004) Treatment of muscle injuries by local administration of autologous conditioned serum: animal experiments using a muscle contusion model. *Int J Sports Med* 25(8):582–587

Das vollständige Literaturverzeichnis ...

... finden Sie in der html-Version dieses Beitrags im Online-Archiv auf der Zeitschriftenhomepage www.DerOrthopaede.de