

Falk Mersmann/Sebastian Bohm/Adamantios Arampatzis

DYSBALANZEN DER MUSKEL- UND SEHNENADAPTATION

Notwendigkeit eines spezifischen Sehnentrainings im (Nachwuchs-)Leistungssport

Die Anpassung von Muskel und Sehne an sportliche Belastung verläuft nicht zwangsläufig ausgewogen. Neben bestimmten Belastungsformen, wie beispielsweise Sprungtraining, können auch Prozesse der körperlichen Reifung durch ihre Wirkung auf das muskuloske-

letale System eine unausgeglichene Entwicklung von Muskelkraft und Widerstandsfähigkeit der Sehne auslösen. Wird dieses Gleichgewicht innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit gestört, erhöht sich die Beanspruchung der Sehne und somit das Risiko für die Ausprägung von

Überlastungserkrankungen der Sehne wie der Tendinopathie. Durch ein spezifisches Sehnentraining können Dysbalancen in der Entwicklung von Muskel und Sehne jedoch vermutlich vorgebeugt werden.

Eingegangen: 26.8.2016

1. Einleitung

Es ist mittlerweile gut belegt, dass sich nicht nur Muskeln, sondern auch Sehnen an mechanische Belastung, wie z. B. sportliches Training, anpassen (Bohm et al., 2015; Wiesinger et al., 2015). Die Plastizität der Sehne kommt dabei in einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls, einem Maß für die Materialeigenschaften der Sehne (Arampatzis et al., 2007a; 2010; Bohm et al., 2014; Reeves et al., 2003; Woo et al., 1980), und einer Hypertrophie (Arampatzis et al., 2007a; Ingelmark, 1948; Kongsgaard et al., 2007) zum Ausdruck. Durch diese beiden Anpassungsmechanismen kann die Steifigkeit, also die mechanische Widerstandsfähigkeit der Sehne, erhöht werden (Vilarta & De Campos Vidal, 1989; Woo et al., 1980). Da die maximal tolerierbare Dehnung einer Sehne nicht veränderbar ist (LaCroix et al., 2013), muss sich bei Zunahme der Muskelkraft auch die Steifigkeit der Sehne erhöhen. So bleibt die Dehnung der Sehne bei maximalen Muskelkontraktionen mit erhöhtem Kraftpotenzial im physiologischen Bereich und die Beanspruchung der Sehne trotz erhöhter Belastung konstant (Arampatzis et al., 2007a; Kongsgaard et al., 2007; Kubo et al., 2001). Bei gesunden Athleten besteht demnach zwischen Sehnensteifigkeit und maximaler willkürlicher Kraft ein enger Zusammenhang (Arampatzis et al., 2007b), was vermuten lässt, dass sich bei gesunden Athleten langfristig ein Gleichgewicht zwischen der Muskelkraft und der Sehnensteifigkeit einstellt.

In den letzten Jahren konnten experimentelle Studien Belege dafür liefern, dass die

Adaptation von Muskel und Sehne nicht notwendigerweise uniform (gleichmäßig) verläuft und sich eine ausgeglichene Anpassung erst langfristig und/oder nur durch geeignete Belastungsformen einstellt. Sehngewebe zeigt im Vergleich zum Muskel eine schlechtere Durchblutung (Smith, 1965) und einen langsameren Stoffwechsel (Laitinen, 1967). Dadurch kann es in einem Trainingsprozess zu einer zeitlichen Diskrepanz der Adaptation von Muskel und Sehnen kommen (Kubo et al., 2011; 2010). Darüber hinaus scheint auch die Art der trainingsinduzierten Belastung für die ausgewogene Adaptation von Muskel und Sehne bedeutsam zu sein. Es existieren mittlerweile zahlreiche Belege aus Interventionsstudien zu zellbiologischen (Heinemeier et al., 2011) und mechanischen Anpassungsreaktionen des Menschen (Arampatzis et al., 2010; 2007a; Bohm et al., 2014; Kubo et al., 2007), dass zwischen Muskel und Sehne bedeutsame Unterschiede existieren hinsichtlich der Trainingsformen, durch die in dem jeweiligen Gewebe anabole Prozesse ausgelöst werden können. So lassen sich beispielsweise Steigerungen der Muskelkraft durch plyometrisches Training (Sprungtraining [Sáez-Sáez de Villarreal et al., 2010]) und Krafttraining im mittleren Intensitätsbereich (30 bis 50 % der maximalen willkürlichen Kraft) erzielen (Mitchell et al., 2012; Moss et al., 1997; Tanimoto & Ishii, 2006), während bedeutsame Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Sehnen bei diesen Belastungsformen ausbleiben (Arampatzis et al., 2010; 2007a; Bohm et al.,

2014; Kubo et al., 2007). Es lässt sich also bilanzieren, dass es im Zuge eines Trainingsprozesses zu Abweichungen im Adaptationsverlauf von Muskel und Sehne kommen kann, insbesondere wenn die Adaptation der Sehne durch die sportliche Trainingsbelastung nicht in geeigneter Weise stimuliert wird.

Eine erhöhte Beanspruchung der Sehne durch eine unausgewogene Adaptation im Verhältnis zur Muskulatur kann das Verletzungsrisiko der Sehne erhöhen. Es ist bekannt, dass Deformationen der Sehne nahe des maximal tolerierbaren Bereiches mit Schädigungen der Gewebestruktur verbunden sind (Butler et al., 1978). Trotz zahlreicher alternativer oder zusätzlicher Einflussfaktoren wird die mechanische Beanspruchung der Sehne demnach auch als primäre Ursache für Überlastungsbeschwerden wie Tendinopathien angesehen (Archambault et al., 1995; Fredberg & Stengaard-Pedersen, 2008). Insbesondere unter Athleten aus Sprint- und Sprungsportarten stellt diese schmerzhaft und funktionseinschränkende, degenerative Sehnenkrankung mit Krankheitshäufigkeiten von bis zu 50 % ein massives gesundheitliches Problem dar (Lian et al., 2005). Bei Patienten und betroffenen Athleten konnten entsprechend erhöhte mechanische Beanspruchungsparameter nachgewiesen werden (Arya & Kulig, 2010; Child et al., 2010; Couppé et al., 2013), was die Autoren zu dem einheitlichen Schluss brachte, dass die Disposition für Tendinopathien mit hoher Wahrscheinlichkeit mit den mechanischen Eigenschaften der Sehne in Verbindung steht. Demzufolge ist die

Vermeidung von Dysbalancen der Muskel-Sehnen-Adaptation für die Prävention von Überlastungsbeschwerden von besonderem Interesse für die Leistungssportliche Praxis.

2. Dysbalancen der Muskel- und Sehnenadaptation im Jugendalter

Neben der mechanischen Belastung, die bereits im Kindesalter Muskel- und Sehneigenschaften beeinflusst (Matos & Winsley, 2007; Waugh et al., 2014), wirkt bei jungen Athleten die körperliche Reifung als zusätzlicher Stimulus auf die Entwicklung des Bewegungsapparates. Durch die bedeutsamen hormonellen und damit verbundenen muskuloskeletalen Veränderungen (Hulthen, 2001; Malina et al., 2004; Tanner et al., 1976) kann das Jugendalter als besonders plastische Phase der körperlichen Entwicklung betrachtet werden, was die Vermutung nahe legt, dass die Entstehung von Dysbalancen der Adaptation von Muskel und Sehne in diesem Zeitraum begünstigt sein könnte. Tatsächlich scheint sich die Beanspruchung der Sehne durch das Längenwachstum zu erhöhen (Neugebauer & Hawkins, 2012). Klinische Studien zeigen zudem einen markanten Anstieg von sportbezogenen Überlastungserscheinungen, insbesondere von bindegewebigen Strukturen wie den Sehnen, bei Jugendlichen im Vergleich zu Kindern (Simpson et al., 2016; Straccolini et al., 2014). Bei jugendlichen Athleten ist diesbezüglich die Tendinopathie die häufigste Überlastungserkrankung (Le Gall et al., 2006). Trotz der offensichtlichen Notwendigkeit, unsere Kenntnisse zur Adaptationsdynamik von Muskel und Sehne im Jugendalter um den Einfluss des Sports zu erweitern, wurde dieser Problematik in der wissenschaftlichen Forschung bislang wenig Beachtung geschenkt. Im Folgenden soll näher beschrieben werden, wie systematische Forschungsbemühungen kürzlich Belege dafür liefern konnten, dass sich bei jugendlichen Volleyballathleten, also einer Hochrisikogruppe für Tendinopathien, Dysbalancen in der Entwicklung von Muskel und Sehne zeigen. Um erste Informationen über den Entwicklungsstand von Muskel und Sehne bei jugendlichen Athleten zu erlangen, haben wir zunächst Volleyball-Kaderathleten im Alter von 16 Jahren rekrutiert und die Eigenschaften der Muskel-Sehnen-Einheit mit denen von langjährig intensiv sportspezifisch trainierenden Erwachsenen verglichen (Mersmann et al., 2014; Details zu dem methodologischen Untersuchungsansatz sind unter www.leistungssport.net verfügbar). Es stellte sich heraus, dass die jugendlichen Athleten

sich hinsichtlich Muskelkraft, dem maximalen Muskelquerschnitt und dem Muskelvolumen bereits auf dem Niveau von Erwachsenen befanden. Der Querschnitt der Sehne war jedoch noch unterentwickelt, was somit in einer erhöhten Beanspruchung der Sehne resultierte.

Der Hypothese folgend, dass sich das morphologische Anpassungspotenzial erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Adoleszenz entfaltet, wurden daraufhin die Veränderungen der Eigenschaften der Muskel-Sehnen-Einheit jugendlicher Volleyball-Kaderathleten von der mittleren (~16 Jahre) zur späten Adoleszenz (~18 Jahre) in einer Längsschnittstudie untersucht (Mersmann et al., 2015a). Tatsächlich zeigte die Sehne über die zwei Jahre eine signifikant größere Querschnittszunahme von 25 % im Vergleich zu den lediglich moderaten Veränderungen des Muskelquerschnitts und -volumens von 6 %. Somit konnte geschlussfolgert werden, dass die morphologische Entwicklung von Muskel und Sehne bei jugendlichen Volleyballathleten nicht uniform und damit nicht ausgewogen verläuft.

Um detaillierte Informationen zum zeitlichen Verlauf der Veränderungen der Muskelkraft und der Widerstandsfähigkeit der Sehne (Steifigkeit) zu gewinnen und den Effekt der Reifung und des sportlichen Trainings ausdifferenzieren zu können, wurden ein Kollektiv jugendlicher Volleyballathleten und eine normal-aktive Kontrollgruppe gleichen Alters über ein Jahr begleitet und Messtermine in dreimonatigen Abständen anberaunt (Mersmann et al., 2016). In beiden Gruppen zeigten sich Zunahmen der Muskelkraft und Sehnensteifigkeit über den Untersuchungszeitraum. Allerdings war die Entwicklung der Muskelkraft bei den Athleten durch signifikant größere Fluktuationen gekennzeichnet, also eine weniger gleichmäßige Entwicklung als in der Kontrollgruppe. Dabei zeigte sich eine Dysbalance der Muskel- und Sehnenadaptation bei den Athleten. Das bedeutet, dass Veränderungen der Kraft, die durch den Muskel auf die Sehne wirken, anders als bei normal-aktiven Jugendlichen, nicht mit den Veränderungen der Widerstandsfähigkeit der Sehne im Einklang stehen. Als Konsequenz war bei den jugendlichen Volleyballathleten die Beanspruchung der Sehne während maximaler Muskelkontraktionen nicht nur chronisch, sondern insbesondere episodisch erhöht (Abbildung 1). Somit scheint unter bestimmten Bedingungen sportliche Belastung eine Störung der ansonsten ausgeglichenen Entwicklung von Muskel und Sehne hervorzurufen zu können. Dabei stellt das sportspezifische Belastungsprofil der hier betrach-

teten Sportart Volleyball eine potenzielle Ursache dar. So hat sich plyometrisches Training (z. B. Sprungtraining) als äußerst wirksam für die Entwicklung von Muskelkraft (Sáez-Sáez de Villarreal et al., 2010), jedoch nicht zur Stimulation der Sehnenanpassung erwiesen (Bohm et al., 2014; Kubo et al., 2007). Da Sportarten mit ähnlichem Belastungsprofil wie Basketball und Leichtathletik (Sprungdisziplinen) ähnliche Sehnenverletzungsprävalenzen aufweisen (Lian et al., 2005), kann hier eine vergleichbare Störungssituation erwartet werden. Folglich hat ein gezieltes Sehnentraining, worauf im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden soll, das Potenzial, die Widerstandsfähigkeit von Sehnen zu verbessern, Dysbalancen der Muskel- und Sehnenadaptation vorzubeugen und damit die Beanspruchung von Sehnen trotz steigendem Kraftpotenzial der Muskulatur bei jugendlichen Athleten aus Risikosportarten zu reduzieren und Sehnenverletzungen vorzubeugen.

3. Effektives Sehnentraining

Der entscheidende Stimulus für die Adaptation der Sehne ist die wiederholte mechanische Zugbelastung des Sehnenwebes, hervorgerufen durch die Kontraktion des zugehörigen Muskels, und die daraus resultierende mechanische Dehnung der Sehne. Dieser mechanische Reiz aktiviert mechanobiologische Signalübertragungswege, die zelluläre und strukturelle Anpassungsprozesse auslösen und damit zu einer Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Sehne führen (Kjaer, 2004; Wang, 2006). Aus mechanobiologischer Sicht kann die mechanische Dehnung der Sehne durch die vier Faktoren Magnitude (Höhe der Dehnung), Frequenz (Anzahl der Wiederholungen der Belastung pro Zeitintervall), Dauer (zeitliche Dauer der einzelnen Reizapplikation) und Rate (Dehnungszunahme pro Zeiteinheit) charakterisiert werden (Arnoczky et al., 2002; Lavagnino et al., 2008; Yamamoto et al., 2003; Yang et al., 2004). In einer Reihe von Experimenten konnte unsere Arbeitsgruppe den Effekt dieser einzelnen Faktoren auf die Adaptation der Achillessehne in vivo im Rahmen von Längsschnittstudien spezifizieren. Die Ergebnisse eines 14-wöchigen Trainings (4-mal pro Woche, 5 Serien) zeigten, dass eine hohe Sehnendehnungsmagnitude ($\geq 5,0$ %) notwendig ist, um Anpassungen in den mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Sehne hervorzurufen (Arampatzis et al., 2010, 2007a). Die Magnitude der externen Dehnung der Sehne muss dabei vermutlich eine Schwelle überschreiten, um eine effektive Übertragung auf die Zellen zu gewähr-

leisten und somit Zellreaktionen zu induzieren (Arampatzis et al., 2007a; Arnoczky et al., 2004). Solch hohe Deformationen wurden durch ein Trainingsprotokoll mit isometrischen, annähernd maximalen Plantarflexionen erreicht, d. h. ~90 % der maximal willkürlichen Kraft (MVC) in einem günstigen Gelenkwinkelbereich (~90°). Darüber hinaus zeigte die Applikation des hohen Dehnungsreizes bei einer geringen Dehnungsfrequenz (0,17 Hz, Wechsel aus 3 s Belastung und 3 s Entspannung, 4 Wiederholungen) stärkere Anpassungsreaktionen als bei einer höheren Dehnungsfrequenz (0,5 Hz, Wechsel aus 1 s Belastung und 1 s Entspannung, 12 Wiederholungen) (Arampatzis et al., 2010). Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Protokoll mit den stärksten Anpassungsreaktionen (hohe Magnitude und geringe Frequenz) als Referenz verwendet, um den Effekt der Dauer und Rate der Dehnung zu quantifizieren. Ein Protokoll mit modifizierter Dauer (12 s Belastung, entspricht einer Verlängerung der Dauer um den Faktor 4) bei gleicher Magnitude und Gesamtbelastungsvolumen führte zwar ebenfalls zu Anpassungsreaktionen der Sehne, jedoch nicht in vergleichbarem Ausmaß wie das Referenzprotokoll (Bohm et al., 2014). Die Modulation der Dehnungsrate wurde durch vertikale Einbeinsprünge mit kurzen Bodenkontaktzeiten erreicht, die mit einer dreifach höheren Dehnungsrate im Vergleich zu den zuvor verwendeten isometrischen Kontraktionen assoziiert waren. Die Studien konnten belegen, dass das Referenzprotokoll dem Protokoll mit hoher Rate hinsichtlich morphologischer und Materialanpassungen der Sehne deutlich überlegen war (Bohm et al.,

2014). Es ist wahrscheinlich, dass eine gewisse Mindestbelastungszeit notwendig ist, um die Übertragung des externen Reizes auf die Zellebene zu ermöglichen. Basierend auf diesen Ergebnissen lassen sich folgende allgemeine Trainingsregeln für eine effektive Anpassung der Sehne ableiten (Abbildung 2.):

- 1 Trainingsprotokolle sollten durch hohe Muskelkräfteeinsätze gekennzeichnet sein ($\geq 85\%$ des isometrischen willkürlichen Kraftmaximums), um die zur Adaptation notwendigen hohen Dehnungen der Sehne auszulösen. Dabei spielt die Form der Muskelkontraktion per se (exzentrisch, isometrisch, konzentrisch) für die Sehnenanpassung keine Rolle.
- 2 Die Dauer der Muskelkontraktion, und damit indirekt die Dehnung der Sehne, sollte ca. drei Sekunden gehalten werden, um eine effektive Übertragung der externen Dehnung auf zellulärer Ebene zu gewährleisten.
- 3 Repetitive Belastungen sind geeigneter als konstant gehaltene längere Belastungen. Weiterhin scheinen höhere Dehnungsraten durch plyometrisches Training nicht so wirksam für die Sehnenadaptation zu sein.

Für die Trainingspraxis sind dementsprechend wiederholte Muskelkontraktionen für ca. drei Sekunden mit großem Kräfteeinsatz gefordert. Insofern empfehlen sich, aufgrund des in der Arbeitsweise hohen Kräftepotenzials des Muskels, Übungen mit isometrischen (statischen) oder exzentrischen (nachgebenden) Kontraktionen des Muskels mit (annähernd) maximal willkürlichem Aufwand ($\geq 85\%$ des isometrischen Maximums). Für das Training der Achillessehne wäre beispielsweise

ein isometrisches Training in einem Winkel von 90° (Fuß rechtwinklig zum Schienbein), für die Patellarsehne hingegen ein Kniegelenkwinkel um 70° (0° entspricht gestrecktem Kniegelenk) zu empfehlen. Um bei dynamischen Übungen die hohe Kräfteentfaltung bei exzentrischen Kontraktionen nutzen zu können und nicht durch das reduzierte Kräftepotenzial des Muskels bei konzentrischen Kontraktionen in der Belastungsgestaltung limitiert zu werden, kann beispielsweise mit beiden Beinen eine hohe (einbeinig konzentrisch nicht mehrfach überwindbare) Last bis in die Gelenkstreckung gebracht und dann die sich anschließende exzentrische Phase einbeinig durchgeführt werden. Damit die Mindestbelastungsdauer in dem optimalen Gelenkwinkelbereich auch unter dynamischen Bedingungen gewährleistet ist, sollte die Zeit der gesamten Bewegungsausführung entsprechend verlängert werden (ca. 6 s). Abbildung 3 (Seite 14) illustriert exemplarisch effektive Übungen an unterschiedlichen Geräten für die Patellarsehne. Ähnliche Übungen können auch für das Training der Achillessehne erarbeitet werden. Unsere Studien zeigten eine hohe Wirksamkeit des Trainings mit einer 5-maligen Wiederholung der Serie (4-maliger Wechsel aus 3 s Belastung und 3 s Entspannung, Abbildung 3), sodass diese Serienanzahl mit einer 1- bis 2-minütigen Pause zu empfehlen ist. Dabei sollte ein gezieltes Sehnentraining für mindestens drei Monate durchgeführt werden und mindestens dreimal pro Woche erfolgen (Bohm et al., 2015; Kubo et al., 2010, 2012). Es bleibt anzumerken, dass ein gezieltes Sehnentraining problemlos direkt in bestehende Krafttrainingspläne integriert

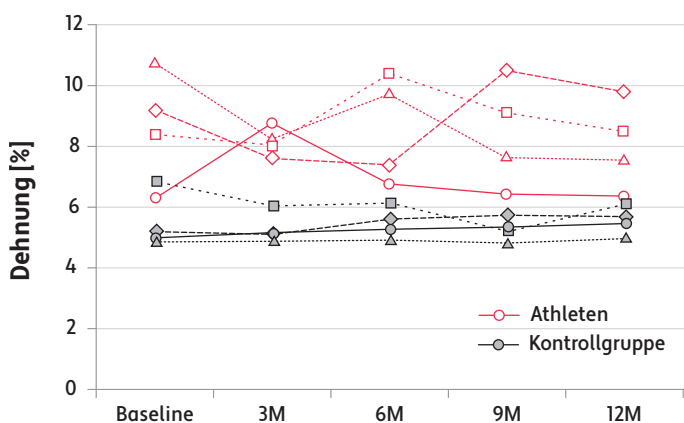


Abbildung 1: Exemplarischer Verlauf der Dehnung der Patellarsehne während maximaler Muskelkontraktionen von jeweils vier Kader-Volleyballathleten (rot) und normal-aktiven Jugendlichen gleichen Alters (grau) über ein Jahr. Die Messungen fanden im Abstand von drei Monaten (M) statt. Es zeigt sich eine chronisch und episodisch höhere Beanspruchung der Sehne bei den Athleten.

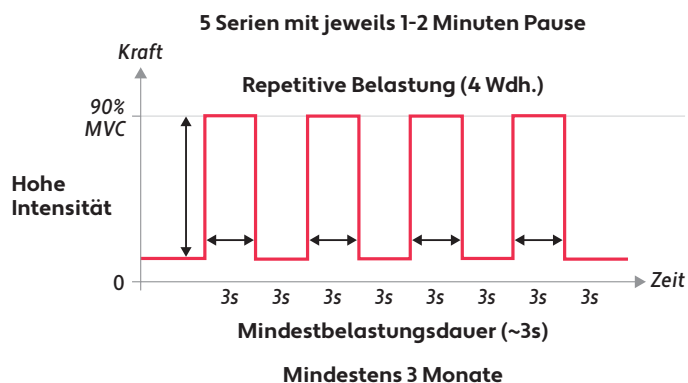


Abbildung 2: Belastungsfaktoren eines effektiven Sehnentrainings dargestellt anhand eines Kraft-Zeit-Verlaufs bei isometrischen Muskelkontraktionen

oder der regulären Trainingseinheit angeschlossen werden kann. Der zeitliche Umfang der Übungen liegt bei ca. 15 bis 20 Minuten, wenn nach der jeweiligen Serie die Pause ggf. für das Training der anderen Seite genutzt wird. Die Übungsausführung an Kraftmaschinen ermöglicht geeignete und sehr kontrollierbare Trainingsbedingungen, ist jedoch nicht darauf festgelegt. Infolge der anzunehmenden Allgemeingültigkeit des oben dargestellten Wirkungsmechanismus auf zellulärer Ebene sind die vorgegebenen Trainingsempfehlungen prinzipiell auf andere Sehnen (z. B. am Schultergelenk) übertragbar. Darüber hinaus gilt es, beim Training im Kindes- und Jugendalter den besonderen Voraussetzungen des sich noch in der Entwicklung befindlichen Skelettsystems Beachtung zu schenken. Demnach ist insbesondere bei dynamischen Übungen die kontrollierte, langsame Bewegungsausführung zu betonen. Dadurch werden ho-

he Beschleunigungen der Lasten und entsprechende Spitzen in der Gelenkbelastung vermieden. Da keine Notwendigkeit für die Verwendung supramaximaler Belastungen (i.e. > 100 % des isometrischen Maximums während exzentrischer Kontraktionen) besteht, kann zusätzlich eine Anpassung des Intensitätsbereiches auf 85 bis 100 % des isometrischen Maximums vorgenommen werden.

4. Zusammenfassung

Die oben stehenden Ausführungen untermauern die Zweckmäßigkeit eines sehnen-spezifischen Trainings im Leistungssport im Allgemeinen und im Jugendalter im Speziellen. Durch die im Vergleich zum Muskel niedrigere Adaptationsrate von Sehnen und die Unterschiede hinsichtlich der Belastungsformen, welche die Widerstandsfähigkeit von Sehnen fördern, kann es während einer Trainingsperiode zu Dysbalancen der Muskel- und Sehnen-

adaptation kommen. Durch den zusätzlichen Einfluss von Reifung und Längenwachstum erscheint das Jugendalter diesbezüglich als besonders kritisch. Insbesondere in Sprungdisziplinen, deren plyometrisches Belastungsprofil vorwiegend die Entwicklung von Muskelkraft und nicht Sehnenadaptation stimuliert, dürfte die resultierende verstärkte Beanspruchung der Sehne das Verletzungsrisiko erhöhen. Als präventive Maßnahme könnten durch ein spezifisches Sehnen-training Belastungsreize gesetzt werden, die gezielt die morphologische Entwicklung und Widerstandsfähigkeit der Sehne fördern und die Beanspruchung der Sehne auch bei zunehmender (absoluter) Belastung konstant halten oder gar reduzieren. Ein derartiges Training bestünde aus wiederholten (z. B. 5 Sätze à 4 Wiederholungen) hochintensiven Kontraktionen ($\geq 85\%$ der maximalen isometrischen Kraft) und einer Anspannungsdauer von drei Sekunden (pro Wiederholung) für isometrische und sechs Sekunden für dynamische (konzentrisch, exzentrisch) Kontraktionen. Auf der Grundlage aktueller wissenschaftlicher Befunde ist neben den der sportlichen Leistung in Schnellkraftdisziplinen zuträglichen Effekten (Bojsen-Møller et al., 2005; Waugh et al., 2013) eine verletzungsprophylaktische Wirkung eines spezifischen Sehnen-trainings anzunehmen und demnach für die Anwendung in der leistungssportlichen Praxis unbedingt zu empfehlen.

Auf www.leistungssport.net stehen die Details zum methodologischen Untersuchungsansatz sowie die Literaturliste zum Download bereit.

Korrespondenzadresse

Univ.-Prof. Dr. Adamantios Arampatzis, Humboldt-Universität zu Berlin, Trainings- und Bewegungswissenschaften, Philippstr. 13, Haus 11, 10115 Berlin
E-Mail: a.arampatzis@hu-berlin.de

Summary

Imbalances of muscle and tendon adaptation

The need for specific tendon training in the high level sport of young athletes
In this article, the current knowledge on the adaptive behaviour of muscles and tendons is summarised. The focus is on own research results concerning imbalances in young athletes as well as on training-induced tendon adaptations. From this, practical implications for the prevention of imbalances in the development of tendons and muscles are derived.

1) Beinstrecker

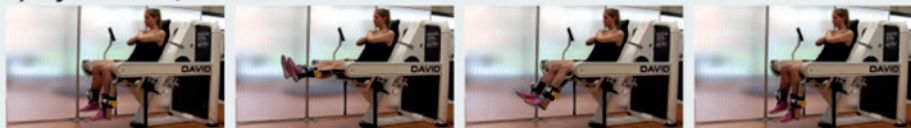
a) Statisch (Isometrik)



b) Dynamisch, Betonung Exzentrik



c) Dynamisch, Konzentrik-Exzentrik



2) Freihantel

a) Statisch (Isometrik)



b) Dynamisch



Abbildung 3: Exemplarische Übungen für ein effektives Patellarsehnentraining.

Wiederholte isometrische Kniestreckungen mit einer hohen Intensität ($\geq 85\%$ des willkürlichen Maximums; 3 s Belastungsdauer pro Wiederholung) bei ca. 70° Kniegelenkwinkel bieten eine sehr geeignete und kontrollierbare Belastungsform und sind an verschiedenen Geräten ausführbar (1a, 2a). Darüber hinaus können dynamische Übungen mit einer Betonung der Exzentrik (eine Extremität unterstützt während der konzentrischen Phase das Anheben der Last, trägt jedoch nicht in der exzentrischen Phase bei; 1b) bzw. als klassische Konzentrik-Exzentrik-Folge eingesetzt werden (1c, 2b). Die dynamischen Übungen sollten entsprechend langsam ausgeführt werden, um die Mindestbelastungsdauer der Sehne im geeigneten Gelenkwinkelbereich zu gewährleisten (eine Ausführungsdauer von etwa 6 s gewährleistet eine Belastungsdauer von ~ 3 s in dem Gelenkwinkelbereich, in dem die notwendigen hohen Sehnenkräfte auftreten). Weitere Übungsbeispiele für das Training der Patellar- und Achillessehne stehen auf www.leistungssport.net bereit.