

Sensomotorische Regulationsmechanismen unter Ermüdungsbedingungen

(AZ 070502/11-12)

Martin Behrens, Anett Mau-Möller, Franziska Wassermann & Sven Bruhn (Projektleiter)

Universität Rostock, Institut für Sportwissenschaft

1 Problem

Aktivitätsinduzierte Ermüdung beschreibt die Reduktion der Fähigkeit des Muskels, Kraft- bzw. Leistung zu generieren, unabhängig davon ob die Aktivität aufrecht erhalten werden kann oder nicht (Gandevia, 2001). Diese Definition impliziert, dass Ermüdung schon relativ zeitnah nach dem Beginn einer anhaltenden Aktivität einsetzt, obwohl das Individuum die Tätigkeit weiter ausführen kann. Die Ermüdung kann sich in unterschiedlichen Subsystemen manifestieren und involviert in Abhängigkeit von der Bewegungsaufgabe metabolische, kardiovaskuläre, biomechanische, neuromuskuläre und psychische Faktoren. Die neuromuskulären Faktoren der Ermüdung sind auf unterschiedlichen Ebenen zu lokalisieren. Erstens die zentralen Elemente der Ermüdung, die die Aktivität des zerebralen Cortex, der Basalganglien und des Cerebellums beinhalten. Darüber hinaus wird die ermüdungsbedingte Veränderung der Impulse ausgehend von zentralen Strukturen als auch ihre Leitung mittels deszendierender motorischer Bahnen sowie die Erregung der Motoneurone dieser Ebene zugeschrieben. Zweitens die peripheren Elemente, zu denen die Reizleitung in Richtung der Axonendigungen, die neuromuskuläre Übertragung, die Aktionspotentialausbreitung entlang des Plasmalemmes der Muskelfaser, die Reizfortpflanzung in das transversale tubuläre System, die Ca^{2+} -Freisetzung aus dem sarkoplasmatischen Retikulum und die Bildung der Querbrücken gehören (McComas, 1996). Die Untersuchung und Analyse von neuromuskulärer Ermüdung ist nicht nur vor dem Hintergrund der Optimierung sportlicher Leistungen relevant, sondern ebenfalls im Hinblick auf Verletzungen und Verletzungsmechanismen. Es konnte nachgewiesen werden, dass Ermüdung nicht nur eine reduzierte Muskelkraft, eine verringerte Reflexamplitude und längere Reflexlaufzeiten implizieren kann (Duchateau & Hainaut, 1993; Motl & Dishman, 2003; Racinais, Girard, Micallef, & Perrey, 2007), sondern ebenfalls eine Minderung der propriozeptiven Funktion möglich ist (Skinner, Wyatt, Hodgson, Conard, & Barrack, 1986). Bis dato existieren keine uns bekannten Studien, die den Einfluss eines gezielten Trainings auf die Adaptabilität des Ermüdungsverhaltens sensomotorischer Regulationsmechanismen eruiert haben. Deshalb lautete die zentrale Forschungsfrage dieser Studie: „Kann die ermüdungsinduzierte Abnahme der reflektorischen und volitiven Aktivierung, die essentiell für die Innervation der gelenkumspannenden Muskulatur und damit für die aktive Gelenkstabilisierung ist, durch gezielte Trainingsreize moduliert werden?“ Eine wirksame Reduktion des Aktivierungsdefizits könnte dazu beitragen, dass die gelenkumspannende Muskulatur über einen längeren Zeitraum oder zum Zeitpunkt eines definierten Ermüdungszustandes optimaler aktiviert wird. Im Hinblick auf die Zielstellung wurden die Effekte von zwei Trainingsinterventionen auf unterschiedliche abhängige Variablen untersucht. Zum einen wurde die Wirkung eines Balance Trainings (BT) analysiert, welches nachweislich zur Verbesserung der aktiven Gelenkstabilisierung und zur Prävention von Sportunfällen beiträgt (Caraffa, Cerulli, Progetti, Aisa, & Rizzo, 1996; Eils & Rosenbaum, 2001; Gruber, Bruhn, & Gollhofer, 2006). Zum anderen diente ein klassisches Ausdauertraining (AT) als Vergleichsintervention, weil es bekannter Weise die Ermüdungswiderstandsfähigkeit der Funktionssysteme des menschlichen Organismus verbessert (Hollmann & Hettinger, 2000). Wir haben angenommen, dass das BT die Leistungsfähigkeit des sensomotorischen Systems verbessert und der Abfall dieser von einem höheren Level startet. Daraus sollte ein Endzustand auf höherem Niveau resultieren. Des Weiteren

wurde angenommen, dass ein AT die Ermüdungswiderstandsfähigkeit erhöht, was hypothetisch eine Reduktion des ermüdungsbedingten Leistungsabfalls induzieren sollte.

2 Methoden

2.1 Studiendesign

Die Studie beinhaltete 3 verschiedene Messstationen, an denen folgende Aspekte untersucht wurden:

- › Messung der neuromuskulären Funktion des M. triceps surae in Ruhe und während einer isometrischen maximalen Willkürkontraktion (iMVC)
- › Messung der anterioren Tibiatranslation und der Reflexantworten der Oberschenkelmuskulatur
- › Messung der statischen posturalen Kontrolle in verschiedenen Bedingungen.

Aufgrund der begrenzten Seitenzahl wird sich in diesem Kurzbericht auf Ersteres „Messung der neuromuskulären Funktion des M. triceps surae in Ruhe und während iMVC“ beschränkt. Die Probandengruppe wurde im Pre-Test vor und nach einem Ermüdungsprotokoll untersucht. Die Änderung der Parameter indizierte die Ermüdungswiderstandsfähigkeit im Hinblick auf die jeweiligen Messgrößen. Nach der Trainingsintervention, die ein BT und ein AT umfasste, wurden die Testpersonen im Post-Test wieder vor und nach einem Ermüdungsprotokoll untersucht. Der Vergleich der ermüdungsbedingten Veränderungen im Pre- und Post-Test erlaubte die Detektion von Adaptationen durch das Training. In Abb. 1 ist das Studiendesign schematisch dargestellt.

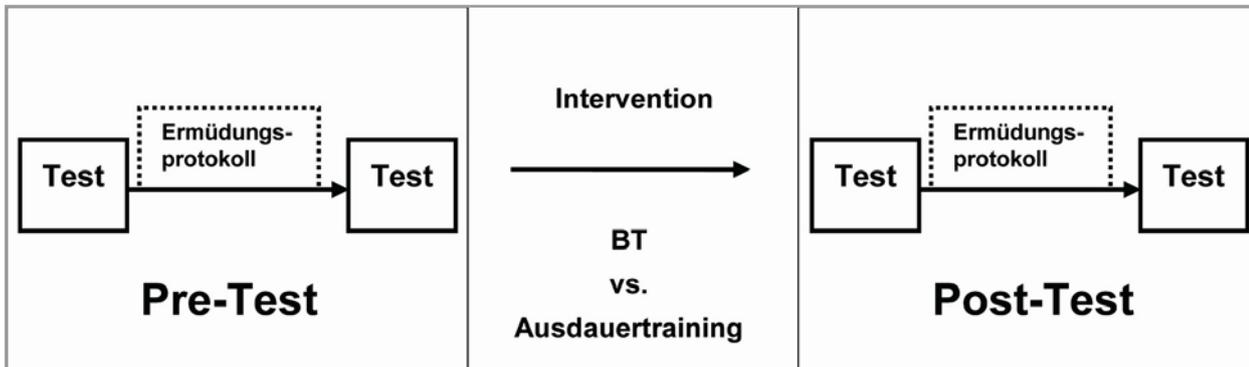


Abb. 1: Schematische Darstellung des Studiendesigns.

Die Testpersonen wiesen weder orthopädische noch neurologische Erkrankungen auf. Die BT-Gruppe bestand aus 12 Personen (5 Frauen, 7 Männer; Alter: 25 ± 3 Jahre). 17 Teilnehmerinnen und Teilnehmer bildeten die AT-Gruppe (9 Frauen, 8 Männer; Alter: 25 ± 3 Jahre) und 16 Personen wurden der Kontrollgruppe (Kon) zugewiesen (9 Frauen, 7 Männer; Alter: 26 ± 3 Jahre).

2.2 Ermüdungsprotokoll und Trainingsinterventionen

Das Ermüdungsprotokoll bestand aus dynamischen Plantarflexionen mit 40 % des maximalen isometrischen Drehmoments bis zum Abbruch. Es wurden 35 Kontraktionen/min absolviert, die durch ein digitales Metronom vorgegeben wurden. Der Abbruch der Ermüdungsintervention erfolgte, wenn der Takt des Metronoms für 5 Wiederholungen und/oder das vorher festgesetzte individuelle Bewegungsausmaß bei 5 aufeinander folgenden Wiederholungen nicht mehr eingehalten werden konnte.

Die Trainingsinterventionen wurden jeweils 2 Mal/Woche über 10 Wochen durchgeführt. Beim BT kamen Stabilisationsübungen auf unebenen und wackeligen Standflächen zur Anwendung. Das AT erfolgte im aeroben aber auch anaeroben Bereich auf einem Fahrradergometer. Die Belastungsintensität wurde über die Herzfrequenz gesteuert. Die detaillierten Inhalte des Trainings sind im Langbericht dargelegt.

2.3 Ablauf des Experiments

Die Messungen wurden am M. triceps surae des rechten Beines durchgeführt. Dafür wurden die Testpersonen standardisiert auf einem Dynamometer positioniert.

Für die Messung der Muskelaktivität kamen Oberflächenelektroden zum Einsatz. Die Elektroden wurden auf die Mm. soleus, gastrocnemius medialis, gastrocnemius lateralis und tibialis anterior aufgebracht. Die Drehmomentsignale wurden mit einem CYBEX NORM Dynamometer (Computer Sports Medicine®, Inc., Stoughton, MA) gemessen. Alle Messungen fanden innerhalb einer statischen Bedingung statt. Die Positionierung der Testpersonen war beim Pre- und Post-Test identisch. Die Messungen erfolgten mit standardisierten Sprung-, Knie- und Hüftgelenkwinkeln von jeweils 90°.

Für die elektrische Stimulation des N. tibialis posterior und N. peroneus communis wurden Oberflächenelektroden appliziert. Die Stimulationsprozedur beinhaltete die Applikation unterschiedlicher Intensitäten, woraus eine Rekrutierungskurve resultierte. Innerhalb dieser Rekrutierungskurve wurden der maximale H-Reflex (H_{max}) und die maximale M-Welle (M_{max}) ermittelt. Die kontraktile Eigenschaften des M. triceps surae wurden anhand des generierten Drehmoments, induziert durch eine supramaximale Stimulation in Ruhe mit Einzel- und Doppelstimuli, abgeschätzt. Die Auslösung der M-Welle (M_{sup}) und V-wave während iMVC erfolgte mittels eines supramaximalen Stimulus.

2.4 Datenanalyse

Die kontraktile Eigenschaften wurden anhand der Kraftspitzen der Drehmoment-Zeit Kurven, induziert durch die Applikation der Einzel- und Doppelstimuli in Ruhe, evaluiert (Pt single and Pt doublet). Für die Berechnung der Anstiegssteilheit (rate of torque development, RTD), des Impulses (IMP) und des isometrischen, maximalen, willkürlichen Drehmoments (iMVT) wurden 10 iMVC-Messversuche herangezogen. RTD und IMP wurden innerhalb von 3 Zeitfenstern analysiert (0-50, 0-100 und 100-200 ms). Die Muskelaktivität während des Anstieges wurde ebenfalls innerhalb von 3 Zeitintervallen berechnet (0-50, 0-100 und 100-200 ms nach Beginn der Muskelaktivität abgeschätzt mittels Elektromyographie [EMG]). Die EMG-Aktivität während iMVT wurde über einen Zeitraum von 200 ms analysiert. Die Muskelaktivität wurde mit Hilfe des root mean squares (RMS) des EMG-Signals bestimmt und zu M_{max} normalisiert ($RMS-EMG/M_{max}$) (Behrens, Mau-Moeller, & Bruhn, 2012). Die Aktivität der einzelnen Anteile des M. triceps surae wurde gemittelt, um eine Aussage über die Gesamtaktivierung dieser Muskelgruppe treffen zu können. Die Amplituden von H_{max} , M_{max} , M_{sup} und V-wave wurden von Spitze zu Spitze berechnet. Anschließend erfolgte die Bildung von Ratios ($H_{max}/$

M_{\max} - und V/M_{\sup} -ratio). Die Daten wurden in eine Kovarianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Zeit (Pre vs. Post) und Gruppe (BT vs. AT vs. Kon) gegeben. Das Geschlecht ging als Kovariate in die Analyse ein.

3 Ergebnisse

In der Tabelle und in den Graphen sind die ermüdungsinduzierten Veränderungsscores (in Absolutwerten in der Tabelle und in Prozent in den Graphen) für Pre und Post dargestellt. Alle in Ruhe erhobenen Parameter zeigten keine signifikante Veränderung nach der Intervention (Tab. 1).

Tab. 1: Auflistung der mechanischen Parameter, induziert durch die elektrische Stimulation des N. tibialis posterior in Ruhe, Pre und Post. Pt = peak torque.

Parameter	BT		AT		Kon		P
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	
Pt (N · m)							
Single	-7,75 ± 11,02	2,61 ± 10,75	-6,11 ± 11,02	0,22 ± 10,75	-9,34 ± 11,01	-8,15 ± 10,74	NS
Doublet	-5,86 ± 9,15	-1,23 ± 14,89	-6,97 ± 9,14	-3,06 ± 14,89	-8,31 ± 9,13	-7,72 ± 14,87	NS
bei H_{\max}	10,80 ± 20,33	18,95 ± 18,38	8,24 ± 21,97	2,51 ± 19,86	7,63 ± 20,31	-1,90 ± 18,36	NS

Die Messung der neuromuskulären Funktion des M. triceps surae während iMVC ergab folgende Ergebnisse. Es wurde eine signifikante Gruppe x Zeit Interaktion für den Parameter RTD 100-200 ms ($F = 5,173$; $P = 0,011$; $\eta^2 = 0,239$) gefunden. Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche ergaben eine signifikante Reduktion der Abnahme von RTD 100-200 für die BT-Gruppe. Alle anderen Parameter zeigten keine signifikanten Veränderungen (Abb. 2).

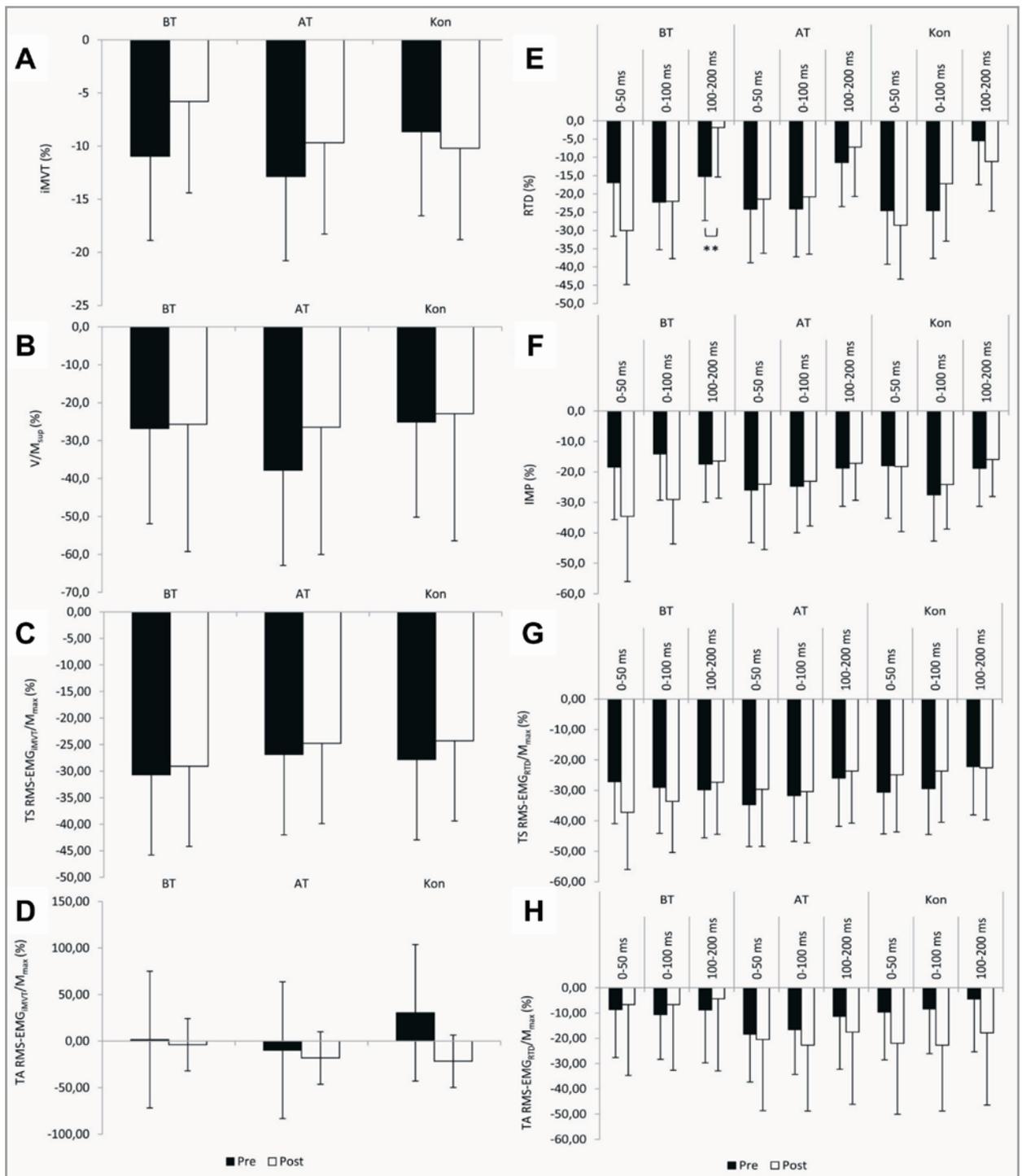


Abb. 2: Veränderungsscores für die jeweiligen Parameter Pre und Post. **A** Isometrisches, maximales, willkürliches Drehmoment ($iMVT$), **B** normalisierte V-wave (V/M_{sup}), **C** normalisierter root mean square des EMG Signals des *M. triceps surae* während $iMVT$ ($TS\ RMS-EMG_{iMVT}/M_{max}$), **D** normalisierter root mean square des EMG Signals des *M. tibialis anterior* während $iMVT$ ($TA\ RMS-EMG_{iMVT}/M_{max}$), **E** rate of torque development (RTD), **F** Impuls (IMP), **G** normalisierter root mean square des EMG Signals des *M. triceps surae* während RTD ($TS\ RMS-EMG_{RTD}/M_{max}$), **H** normalisierter root mean square des EMG Signals des *M. tibialis anterior* während RTD ($TA\ RMS-EMG_{RTD}/M_{max}$). * signifikanter Unterschied zu Pre (** $P \leq 0,01$).

5 Diskussion

Die Trainingsinterventionen zeigten keine Effekte im Hinblick auf die in Ruhe erhobenen Parameter. Es wurde lediglich ein signifikantes Ergebnis für RTD 100-200 ms der BT-Gruppe gefunden, d. h. die ermüdungsbedingte Abnahme der RTD in diesem Zeitfenster war reduziert. Demzufolge scheint ein BT die ermüdungsbedingte Reduktion der RTD in diesem Zeitfenster positiv zu beeinflussen. Dieser Aspekt könnte für die sportliche Leistung sowie für Verletzungssituationen, in denen Ermüdung eine Rolle spielt, relevant sein. Für sportliche Leistungen, die hohe Anforderungen an die Explosivkraft stellen, scheint ein BT den ermüdungsbedingten Abfall dieser Schnellkraftleistung positiv zu beeinflussen. Demzufolge scheint ein BT für Sportarten interessant und relevant zu sein, deren Leistung durch repetitive und explosive Kontraktionen bestimmt wird. Denn gerade bei solchen Belastungen setzt die Ermüdung zeitnah ein.

Im Hinblick auf Verletzungssituationen haben epidemiologische Daten gezeigt, dass Verletzung gehäuft am Ende von Sportspielen auftreten (Hawkins, Hulse, Wilkinson, Hodson, & Gibson, 2001; Price, Hawkins, Hulse, & Hodson, 2004). Demnach scheint die Ermüdung ein Risikofaktor für Verletzungen zu sein und der Erhalt der Muskelfunktion könnte Verletzungen vorbeugen. Eine Studie von Krosshaug et al. (2007), die sich mit den Verletzungsmechanismen beschäftigte, die zur Ruptur des vorderen Kreuzbandes beitragen, zeigte jedoch, dass diese in einem Zeitfenster von 17-50 ms nach Bodenkontakt auftreten. Legt man dieses Zeitfenster zugrunde, erscheint das Ergebnis dieser Studie für die Verletzungsprävention nicht relevant. Die Reduktion der ermüdungsbedingten Abnahme der RTD ging nicht mit einer Veränderung der neuromuskulären Aktivierung einher. Folglich scheint die neuromuskuläre Aktivierung nicht ursächlich verantwortlich für die Änderung des mechanischen Outputs. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die beiden Trainingsinterventionen keine umfassende Anpassung der neuromuskulären Funktion des *M. triceps surae* in Ruhe und während iMVC ausgelöst haben. Somit scheint keine der beiden Trainingsmaßnahmen dazu geeignet zu sein, den ermüdungsbedingten Funktionsverlust der *M. triceps surae* zu reduzieren.

6 Literatur

- Behrens, M., Mau-Moeller, A., & Bruhn, S. (2012). Effect of Exercise-induced Muscle Damage on Neuromuscular Function of the Quadriceps Muscle. *International journal of sports medicine*, 33 (8), 600-606.
- Caraffa, A., Cerulli, G., Projetti, M., Aisa, G., & Rizzo, A. (1996). Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 4 (1), 19-21.
- Duchateau, J., & Hainaut, K. (1993). Behaviour of short and long latency reflexes in fatigued human muscles. *The journal of physiology*, 471, 787-799.
- Eils, E., & Rosenbaum, D. (2001). A multi-station proprioceptive exercise program in patients with ankle instability. *Medicine and science in sports and exercise*, 33 (12), 1991-1998.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological reviews*, 81 (4), 1725-1789.
- Gruber, M., Bruhn, S., & Gollhofer, A. (2006). Specific adaptations of neuromuscular control and knee joint stiffness following sensorimotor training. *International journal of sports medicine*, 27 (8), 636-641.
- Hawkins, R. D., Hulse, M. A., Wilkinson, C., Hodson, A., & Gibson, M. (2001). The association football medical research programme: an audit of injuries in professional football. *British journal of sports medicine*, 35 (1), 43-47.
- Hollmann, W., & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin - Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin* (Vol. 4. Aufl.). Stuttgart: Schattauer.
- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., et al. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *American journal of sports medicine*, 35 (3), 359-367.
- McComas, A. J. (1996). *Skeletal muscle - Form and function*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Motl, R. W., & Dishman, R. K. (2003). Acute leg-cycling exercise attenuates the H-reflex recorded in soleus but not flexor carpi radialis. *Muscle Nerve*, 28 (5), 609-614.
- Price, R. J., Hawkins, R. D., Hulse, M. A., & Hodson, A. (2004). The Football Association medical research programme: an audit of injuries in academy youth football. *British journal of sports medicine*, 38 (4), 466-471.
- Racinais, S., Girard, O., Micallef, J. P., & Perrey, S. (2007). Failed excitability of spinal motoneurons induced by prolonged running exercise. *Journal of neurophysiology*, 97 (1), 596-603.
- Skinner, H. B., Wyatt, M. P., Hodgdon, J. A., Conard, D. W., & Barrack, R. L. (1986). Effect of fatigue on joint position sense of the knee. *Journal of orthopaedic research*, 4 (1), 112-118.