

---

## Plyometrisches Training – Sprung- und Kniebelastung

Albert Gollhofer (Projektleiter)

Universität Freiburg, Institut für Sport und Sportwissenschaft

### Problemstellung

Knie- und Sprunggelenksverletzungen sind die häufigsten Verletzungen im Sport. Auffällig ist, dass beide Verletzungsbilder zumeist ohne Gegnerkontakt zustande kommen (Arendt & Dick, 1995). Dieses Phänomen des Gelenktraumas ohne Gegnereinwirkung ist von besonderem Interesse und lässt vermuten, dass die muskuläre Ermüdung eine wesentliche Rolle in der Ätiologie von Gelenksverletzungen spielt. So fanden beispielsweise Price et al. (2004) heraus, dass sich Fußballspieler am häufigsten in den letzten 15 Minuten des Fußballspiels eine Verletzung zuzogen. Eine Verbesserung der Ermüdungsresistenz durch verletzungspräventives Training könnte die o. g. Kausalität auflösen und zu einer verringerten Verletzungsinzidenz führen. Obwohl einzelne Studien bereits positive Effekte hinsichtlich der Verletzungsrate infolge eines plyometrischen Trainings beschreiben (Hewett et al. 1999, Gilchrist et al., 2008; Mandelbaum et al., 2005), fehlte bisher eine genauere Betrachtung der Gelenksbelastung der unteren Extremität nach einem mehrwöchigen plyometrischen Training in einer Bewegungssituation mit muskulärer Ermüdung. Dieser Zusammenhang wurde in dieser Studie (*1. Ziel*) innerhalb einer fußballspezifischen Bewegung untersucht. Ein weiterer Faktor, der eine große Rolle bei der Ätiologie von Gelenksverletzungen zu spielen scheint, ist die Güte des Landeverhaltens bzw. der Charakter des Untergrundes (Dufek & Bates, 1991). Orchard (2002) geht davon aus, dass sich bei harten Böden (wenig Niederschlag) mehr non-contact VKB-Rupturen ereignen als bei weicheren Böden. Diesem Gesichtspunkt wurde Rechnung getragen (*2. Ziel*), indem in allen Testsituationen die gewählte fußballspezifische Bewegung einerseits auf einem harten Untergrund und andererseits auf einem weichen Untergrund durchgeführt wurde. Ferner ist die Bewegungsgeschwindigkeit ein essentieller Faktor der resultierenden Gelenksbelastung (Chappell et al., 2005). Demzufolge wurde zusätzlich der Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Gelenksbelastungen evaluiert (*3. Ziel*). Aufgrund aktueller Tendenzen der Forschung wurde schwerpunktmäßig die Kniegelenksbelastung betrachtet.

### Methodik

**Probanden:** An der Studie nahmen 22 männliche Amateurfußballspieler teil, die verletzungs- und beschwerdefrei waren, sowie keine bisherigen Kniegelenksverletzungen hatten. Die Athleten wurden randomisiert der plyometrischen Trainingsgruppe (N = 12; Alter =  $23,5 \pm 3$  Jahre; Größe =  $1,78 \pm 0,04$  m; Gewicht =  $74,5 \pm 8$  kg) bzw. der Kontrollgruppe (N = 10; Alter =  $24,7 \pm 3$  Jahre; Größe =  $1,80 \pm 0,1$  m; Gewicht =  $77,3 \pm 8$  kg) zugeordnet und gaben vor Studienbeginn ihre Einwilligung zur Studienteilnahme.

**Messsetup und Datenauswertung:** Die Probanden führten Lauf-Bewegungen mit einer Richtungsänderung (Cutting-Manöver) von 45° aus. Bei einer Laufgeschwindigkeit von  $4,0 \pm 0,3$  m/s (schnelle Bedingung) bzw.  $3,0 \pm 0,3$  m/s (langsame Bedingung) trafen die Probanden mit dem linken Fuß die Kraftmessplatte (AMTI OR6-7, Waterton, USA) und drückten sich zur rechten Seite hin ab. Um die harten bzw. weichen Untergrundbedingungen zu simulieren wurden die Bewegungen sowohl direkt auf der Kraftmessplatte als auch mit einer zusätzlichen weichen Auflage (Airexmatte Coronella, Mattendicke 1,2 cm) durchgeführt.

Neben den kinetischen Daten der Kraftmessplatte (1000 Hz) wurden auch kinematographische Daten erhoben. Mittels eines aus sechs Kameras bestehenden infrarotbasierten Bewegungsanalysesystems (VICON Motion Systems Ltd., Oxford, UK) wurden die Bewegungen des Knie- und Sprunggelenks und die Gelenkmomente mit einer Aufnahme Frequenz von 120 Hz bestimmt (vgl. Davis et al., 1991).

Die dritte Komponente der komplexen Bewegungsanalyse stellte die elektromyographische Analyse der gelenksumgreifenden Muskulatur (m. vastus lateralis, m. vastus medialis, m. biceps femoris und m. gastrocnemius lateralis) dar. Die elektromyographischen Daten wurden nach den gängigen Standards aufgezeichnet, weiterverarbeitet und über die Zeitabschnitte 50 ms vor Bodenkontakt (Voraktivierung) und 50 ms nach Fußaufsatz integriert (IEMG).

**Ermüdungsprotokoll:** Ziel der Studie war es die Veränderungen der Gelenkskontrolle unter funktionellen Ermüdungsbedingungen zu ermitteln. Demzufolge wurde eine Ermüdung gewählt, welche die spezifischen Belastungen des Fußballspiels imitierte. Das 15-minütige Protokoll sah eine Kombination aus alternierend durchgeführten schnellen Sprints, Sprüngen, Übungen mit Zusatzgewichten (Ausfallschritte) und entsprechend angepasster Pausengestaltung vor.

**Trainingsintervention:** Das plyometrische Trainingsprogramm wurde zweimal pro Woche über einen Zeitraum von 6 Wochen durchgeführt. Jeder Proband nahm somit an zwölf 30-minütigen Trainingseinheiten teil, denen ein individuelles Aufwärmen von 10 Minuten vorgeschaltet war. Das Training war in drei 2-wöchige Phasen eingeteilt. Intention von Phase I war eine Schulung der Sprung- und Landekontrolle. Hierzu wurden verbale Instruktionen zur Körperposition (Landung mit schulterbreit platzierten Füßen, leicht gekrümmter Rücken, Kopf geradeaus blickend) und zu einer kräfteabsorbierenden Landetechnik (starke Beugung in Knie- und Hüftgelenk) gegeben. Intention von Phase II war es, die in Phase I erlernten Techniken bei maximalen Intensitäten zu trainieren. In der abschließenden Phase III wurden kombinierte Bewegungen aus Sprüngen, Landungen, Körperdrehungen und Richtungswechsel unter Beibehaltung der erlernten Strategien ausgeführt.

Zur statistischen Analyse wurden Varianzanalysen mit den Faktoren Training (prä, post), Ermüdung (unermüdet, ermüdet), Bodenbeschaffenheit (weich, hart) und Laufgeschwindigkeit (schnell, langsam) auf einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt.

## Ergebnisse

**Einfluss von Geschwindigkeit und Bodenbelag:** In der harten Bedingung traten signifikant höhere Außenrotationsmomente auf als in der weichen Bodenbedingung ( $p < 0,05$ ). Sowohl hinsichtlich Flexions- als auch Adduktionsmomenten zeigte sich keine Auswirkung des Bodenbelages. Zu beachten sind jedoch die generell sehr hohen Gelenkmomente der Kniegelenksadduktion, die sogar die Flexionsmomente überstiegen (Abb. 1, rechts). Auch bezüglich der Muskelaktivität ließen sich keine Unterschiede zwischen den Bodenbelägen ermitteln. Bei allen gemessenen kniegelenksumgreifenden Muskeln ergaben sich weder in der Phase der Präaktivierung (50 ms vor Bodenkontakt) noch in der Phase kurz nach Bodenkontakt (50 ms nach Fußaufsatz) Unterschiede hinsichtlich der Quantität der Muskelaktivierung (IEMG). Die Knieflexionsmomente wurden durch die Modulation der Geschwindigkeit stark beeinflusst. Ausgehend von der langsamen Geschwindigkeit (3 m/s) erhöhten sich die maximalen Flexionsmomente von 0,95 Nm/kg bei der schnellen Geschwindigkeit (4 m/s) um 42 % auf 1,35 Nm/kg ( $p < 0,05$ ). Hinsichtlich der Gelenkmomente der Frontal- und Transversalebene wirkte sich die Geschwindigkeitsvariation nicht aus (Abb. 1, links). Mit der Modulation der Laufgeschwindigkeit ging eine generelle Veränderung der Muskelaktivierung einher. Sowohl die beiden gemessenen Anteile des m. quadriceps femoris als auch die an der Knieflexion beteiligten Muskeln m. biceps femoris und m. gastrocnemius wurden bei der schnellen Bewegung in der Phase der Voraktivierung signifikant verstärkt aktiviert. Auch in den ersten 50 ms des Bodenkontaktes war mit Ausnahme der m. gastrocnemius eine erhöhte Muskelaktivität (IEMG) festzustellen.

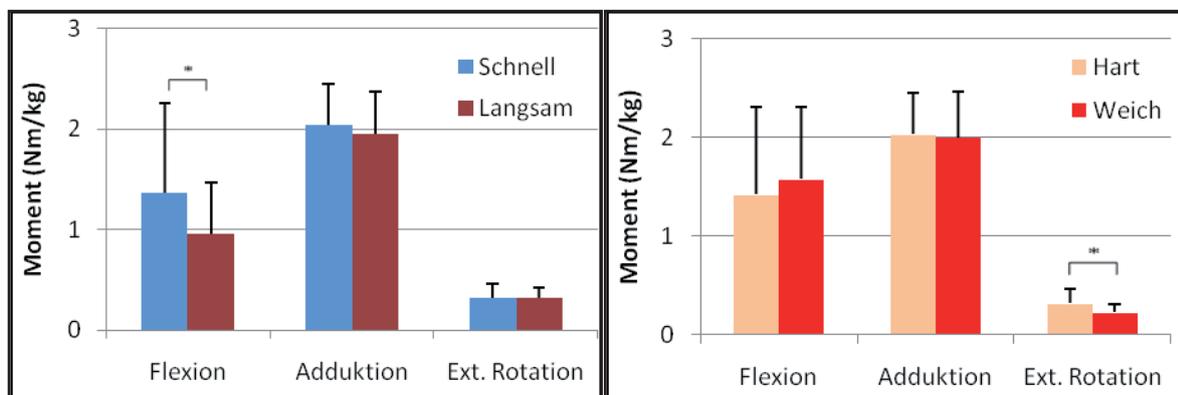


Abb. 1: Kniegelenksmomente in Abhängigkeit der Laufgeschwindigkeit (links) (schnell = 4 m/s; langsam = 3 m/s)  
Kniegelenksmomente in Abhängigkeit von weichem und hartem Bodenbelag (rechts)

**Einfluss von Ermüdung:** Die Kniegelenksmomente erfuhren durch die funktionelle Ermüdung keinerlei Veränderung. Weder hinsichtlich der Kniegelenksflexion noch hinsichtlich der Adduktion oder Außenrotation führte das Ermüdungsprotokoll zu veränderten Momenten (Abb. 2). Gleichermäßen zeigten sich auch bei der Betrachtung der Momente des Sprunggelenks keine signifikanten Modifikationen

durch Ermüdung (Abb. 2). Vergleicht man die auftretenden Momente zwischen Sprung- und Kniegelenk, so ist jedoch auffällig, dass das Sprunggelenk verstärkt in der Sagittalebene belastet wird während beim Kniegelenk höhere Momente in der Frontalebene zu beobachten sind.

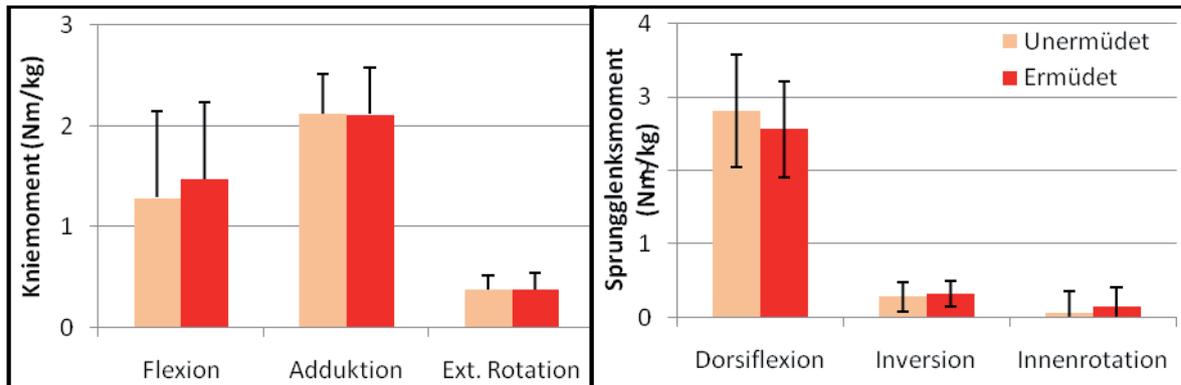


Abb. 2: Kniegelenksmomente (links) und Sprunggelenksmomente (rechts) in Abhängigkeit vom Ermüdungszustand

Betrachtet man die Muskelaktivierung, so sind im Vergleich vor und nach Ermüdung keine Veränderungen festzustellen. Sowohl die Voraktivierung als auch die frühe Aktivierung bei Bodenkontakt bleiben bei allen Muskeln unverändert.

**Einfluss der Trainingsintervention:** Um den Einfluss der Trainingsintervention auf die Kniegelenkskontrolle unter ermüdetem Einfluss zu bestimmen wurden die dreidimensionalen Komponenten der Bodenreaktionskräfte bei der schnellen Geschwindigkeit von 4 m/s verglichen. Die vertikal auftretenden Kräfte waren bei der hier gewählten Bewegung etwa doppelt so hoch wie die Kräfte, die in der Horizontalen wirkten. Dennoch traten mit etwa 15 N/kg auch deutliche posterior gerichtete Bremskräfte sowie durch den Richtungswechsel bedingte zur Körpermitte gerichtete Kräfte (etwa 10 N/kg) auf. Die einzelnen Komponenten der Bodenreaktionskraft unterschieden sich zwischen Eingangs- und Ausgangsmessung weder bei der Kontroll- noch bei der Trainingsgruppe. Das plyometrische Trainingsprogramm resultierte somit nicht in einer Reduktion der global auf den Körper einwirkenden Kräfte (Abb. 3). Ferner wirkte sich das Trainingsprogramm nicht auf die Quantität der Muskelaktivierung aus. Weder bei den Kniegelenksexpensoren noch bei den Kniegelenksflexoren ergaben sich Veränderungen des IEMGs durch die Trainingsintervention.

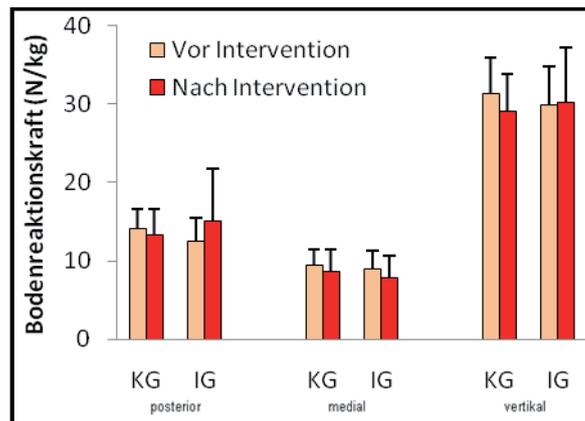


Abb. 3: Kniegelenksmomente der Interventionsgruppe (IG) und der Kontrollgruppe (KG) bei der Eingangsmessung und nach der 6-wöchigen Intervention

## Diskussion

### ***Einfluss von Geschwindigkeit und Bodenbelag auf die Kniegelenkskontrolle***

Die Ergebnisse der aktuellen Studie geben keinerlei Hinweise auf unterschiedliche Gelenkbelastung oder muskuläre Kompensation zwischen der hier gewählten harten und weichen Bodenbedingung. Obwohl die simulierte weiche Bedingung (12 mm starke Airex-Matte) rein subjektiv von den Probanden als weich und schwammig empfunden wurde, spiegelte sich dies nicht in den Gelenkmomenten wider. Es zeigte sich also durch die simulierte weiche Bedingung keine derartige Dämpfung, die sich gelenkmomentenreduzierend auf das Kniegelenk auswirkt. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Schuh-Untergrund-Situation im Fußball (Milburn & Barry, 1998) sollten zukünftige Studien den Einfluss der Komponenten Schuh und Bodenbeschaffenheit weiter untersuchen.

Ein weiteres Ziel der Studie war es, den Einfluss der Laufgeschwindigkeit bei Cutting-Manövern zu evaluieren. Hierzu führten die Probanden die Bewegung mit 3 m/s und 4 m/s aus. Es zeigte sich, dass lediglich die Flexionsmomente bei der schnelleren Geschwindigkeit erhöht waren. Die mit Verletzungen assoziierten Momente der Frontal- und Transversalebene wurden durch die Geschwindigkeitsmodulation nicht beeinflusst. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass unter solch geplanten durchgeführten Bewegungen die Kniegelenksbelastung durch in dieser Studie aufgezeigten Geschwindigkeitsmodulationen nicht erhöht scheint. Dies ist auch durch muskuläre Kompensationsstrategien zu erklären. Quadrizeps und vor allem auch Hamstrings zeigten bei der schnelleren Bedingung in der Voraktivierung und in der Phase der Absorption eine erhöhte Aktivität. Dies kann als ko-kontrahierender Stabilisationsmechanismus der kniegelenksumgreifenden Muskulatur interpretiert werden, der nicht nur eine anteriore Tibiatranslation sondern auch eine Kniegelenks-Abduktion kompensieren kann (Hewett et al., 2006).

### ***Einfluss von Ermüdung auf die Knie- und Sprunggelenkskontrolle***

In der vorliegenden Studie wurde die Veränderungen der Gelenkmomente und der Aktivität der gelenksumgreifenden Muskulatur durch ein funktionelles Ermüdungs-

protokoll bei Cutting-Bewegungen ermittelt. Das Ermüdungsprotokoll sah eine sportartnahe, hochintensive Belastung über einen Zeitraum von 15 Minuten vor. Durch die Ermüdung veränderten sich weder die Sprung- noch die Kniegelenkmoment der ersten Phase des Bodenkontaktes. Während in einigen Studien mit komplexen, dynamischen Bewegungen bisher von erhöhten Gelenkmomenten nach Ermüdung berichtet wird (Chappell et al., 2005; McLean et al., 2007), konnten Sanna und O'Connor (2008) ebenfalls keine Veränderung der Gelenkmomente nach Ermüdung feststellen. Diese Vermutung liegt nahe, dass sowohl die Belastungsnormative des Ermüdungsprotokolls als auch die Spezifikation der gewählten Testsituation Einfluss auf die ermüdungsbedingten Veränderungen haben.

Die nicht veränderte Muskelaktivität der Voraktivierung als auch der frühen Kompensationsphase des Bodenkontaktes deuten darauf hin, dass sich muskuläre Kontrollmechanismen durch die Ermüdung prinzipiell nicht verändert hatten. So konnte beispielsweise keine Erhöhung des mit Vorderen Kreuzband-Verletzungen assoziierten Aktivierungs-Verhältnisses von Quadrizeps/Hamstrings festgestellt werden, wie dies bei Landungen der Fall war (Padua et al., 2006; Pappas et al., 2007). Folglich ergeben sich – mit dem durchgeführten Ermüdungsprotokoll – sowohl aus mechanischer als auch aus muskulärer Betrachtungsweise keine Auswirkungen auf die generelle Beanspruchung der unteren Extremitäten. Ursächlich hierfür könnte, neben der Tatsache einer generellen Tolerierbarkeit und Kompensation solch funktioneller und daher gewohnter Belastung, die Dauer der Ermüdung von nur 15 Minuten sein. Zukünftige Studien mit unterschiedlichen Ermüdungsprotokollen könnten hier weitere Klarheit schaffen.

### ***Einfluss von plyometrischem Training auf die Gelenkskontrolle***

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Intervention bestand aus einem sechswöchigen plyometrischen Training, das neben einer dynamisch-explosiven Komponente auch eine Technikschiulung beinhaltete. In früheren Studien konnten durch ähnliche Trainingsprogramme bei weiblichen Sportlern Reduktionen von Bodenreaktionskräften (Myer et al., 2006; Hewett et al., 1996) und Gelenkmomenten (Myer et al., 2005) erzielt werden. In der aktuell vorliegenden Studie konnten durch das Trainingsprogramm keine Veränderungen der Bodenreaktionskräfte bei Cutting-Bewegungen festgestellt werden. Weder vertikalen noch die horizontalen Komponenten der global wirkenden Kräfte wurden bei der Trainingsgruppe reduziert. Ferner zeigten sich auch keine Veränderungen hinsichtlich der Muskelaktivierung. Insbesondere wurde das Verhältnis der Quadrizeps/Hamstrings-Aktivierung nicht reduziert, was als protektiver Mechanismus für das Vordere Kreuzband hätte gedeutet werden können.

Folgt man den Ergebnissen von Myer et al. (2007) so ist zu beachten, dass bei den Effekten eines Trainingsprogramms zwischen Populationen mit hohem und niedrigem Verletzungsrisiko unterschieden werden muss. Somit besteht die Vermutung, dass eine Reduktion des Verletzungsrisikos mit der gewählten Intervention und bei vergleichbarer Population (männliche, unverletzte Probanden) unwahrscheinlich erscheint. Ferner besteht jedoch auch grundsätzlich die Möglichkeit, dass mit dem gewählten plyometrischen Trainingsprogramm, welches vorwiegend aus Sprungbe-

wegungen bestand, kein Transfer zu den hochkomplexen Cutting-Manövern möglich ist. Positive Effekte ähnlicher Trainingsprogramme wurden bisher lediglich bei Landungen berichtet (Myer et al., 2005; Myer et al., 2006; Hewett et al., 1996). Es stellt sich somit die Frage, ob präventive Effekte von plyometrischen Trainingsprogrammen ausschließlich bei Bewegungen zu erwarten sind, die denen des Trainingsprogramms sehr ähnlich sind (vertikale Landungen, reaktive Sprünge). Es besteht demzufolge der Bedarf zukünftiger Studien, die dieses Ergebnis verifizieren bzw. andere Trainingsprogramme bei unterschiedlichen Populationen evaluieren.

## Literatur

- Arendt, E. & Dick, R. (1995). Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *American journal of sports medicine*, 23, 694–701.
- Chappell, J.D., Herman, D.C. et al. (2005) Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks. *American journal of sports medicine*, 33, 1022–1029.
- Davis, R.B., Ounpuu, S., Tyburski, D. & Gage, J.R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10, 575-587.
- Dufek, J.S. & Bates, B.T. (1991). Biomechanical factors associated with injury during landing in jump sports. *Sports medicine*, 12 (5), 326-37.
- Gilchrist, J., Mandelbaum, B. et al. (2008). A Randomized Controlled Trial to Prevent Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury in Female Collegiate Soccer Players. *American journal of sports medicine*, 36, 1476
- Hewett, T.E., Myer, G.D. & Ford, K.R. (2006). Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. *American journal of sports medicine*, 34, 299-311.
- Hewett, T.E., Lindenfeld, T.N., Riccobene, J.V. & Noyes, F.R. (1999). The effect of neuromuscular training on the incident of knee injury in female athletes. A prospective study. *American journal of sports medicine*, 27, 699-706
- Hewett, T.E., Stroupe, A.L., Nance, T.A. & Noyes, F.R. (1996). Plyometric Training in Female Athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *American journal of sports medicine*, 24, 765- 773
- Mandelbaum, B.R., Silvers, H.J., Watanabe, D.S. et al. (2005). Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *American journal of sports medicine*, 33, 1003-1010.
- McLean, S.G., Felin, R.E., Suedekum, N., Calabrese, G., Passerallo, A. & Joy, S. (2007). Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Medicine and science in sports and exercise*, 39, 502–514.
- Milburn, P.D. & Barry, E.B. (1998). Shoe-surface interaction and the reduction of injury in rugby union. *Sports medicine*, 25, 319-327.
- Myer, G.D., Ford, K.R., Brent, J.L. & Hewett, T.E. (2007). Differential neuromuscular training effects on ACL injury risk factors in “high-risk” versus “low-risk” athletes. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 8 (39), 1-7

- Myer, G.D., Ford, K.R., Brent, J.L. & Hewett, T.E. (2006). The effects of plyometric vs. dynamic stabilization and balance training on power, balance, and landing force in female athletes. *The Journal of strength and conditioning research*, 20 (2), 345-353
- Myer, G.D., Ford, K.R., Palumbo, J.P. & Hewett, T.E. (2005). Neuromuscular training improves performance and lower-extremity biomechanics in female athletes. *Journal of Strength and conditioning Research*, 19 (1), 51-60.
- Orchard, J. (2002). Is there a relationship between ground and climatic conditions and injuries in football? *Sports medicine*, 32 (7), 419-432
- Padua, D.A., Arnold, B.L. et al. (2006). Fatigue, vertical leg stiffness, and stiffness control strategies in male and females. *Journal of Athletic Training*, 41 (3), 294-304.
- Pappas, E., Sheikhzadeh, A., Hagins, M. & Nordin, M. (2007). The effect of gender and fatigue on the biomechanics of bilateral landings from a jump: Peak values. *Journal of sports science and medicine*, 6 (1), 77-84.
- 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, 466–471.
- Sanna, G. & O'Connor, K.M. (2008). Fatigue-related changes in stance leg mechanics during sidestep cutting maneuvers. *Clinical biomechanics*, 23, 946-954