

Wolf Petersen¹, Dieter Rosenbaum², Michael Raschke¹

Rupturen des vorderen Kreuzbandes bei weiblichen Athleten. Teil 1: Epidemiologie, Verletzungsmechanismen und Ursachen

Anterior Cruciate Ligament Ruptures in Female Athletes. Part 1: Epidemiology, Injury Mechanisms, and Causes

¹ Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Münster

² Funktionsbereich Bewegungsanalytik, Klinik für Allgemeine Orthopädie, Universitätsklinikum Münster

Zusammenfassung

Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass Kreuzbandrupturen im Ballsport bei weiblichen Sportlern etwa 2,4 bis 9,5 mal häufiger vorkommen als bei Männern. Ungefähr 70 % der Verletzungen entstehen ohne direkte Beteiligung eines Mitspielers (sogenannte Nicht-Kontakt-Situationen), und verschiedene Studien haben gezeigt, dass Kreuzbandrisse im Ballsport am häufigsten bei der Landung nach einem Sprung und während schneller Richtungswechsel entstehen. Videoanalysen ergaben, dass sich das Kniegelenk zur Zeit der Verletzung am häufigsten in leichter Beugung, in Valgus- und Außenrotationsstellung befindet. In dieser Knieposition ist die Spannung im vorderen Kreuzband am höchsten, und die muskulären Agonisten des vorderen Kreuzbandes, die ischiokruralen Muskeln, haben einen ungünstigen Hebelarm, um das Tibiaplateau zu sichern. Eine plötzliche Anspannung dieses Muskels kann bei diesen Kraftverhältnissen der Hebelarme zur Ruptur des vorderen Kreuzbandes führen. Es gibt einerseits Hinweise, dass Unterschiede in der Koordination von Bewegungen und der neuromuskulären Kontrolle die unterschiedliche Inzidenz von Kreuzbandverletzungen bei Männern und Frauen erklären können. Frauen landen nach einem Sprung aufrechter mit einem nur wenig gebeugten Kniegelenk. In dieser Position ist das vordere Kreuzband nur schlecht durch die ischiokrurale Muskulatur geschützt. Zusätzlich sind Frauen häufig quadrizepsdominant. Andererseits gibt es Hinweise, dass die Bandlaxizität und die muskulotendinöse Steifigkeit durch geschlechtsspezifische hormonelle Unterschiede beeinflusst werden.

Schlüsselwörter: Verletzungsmechanismen, Nicht-Kontakt-Verletzungen, Präventionsprogramme, Ballsport, Vorderes Kreuzband

Einleitung

Die Ruptur des vorderen Kreuzbandes ist eine ernste Kniegelenksverletzung. Aufgrund der Instabilität kommt es bei Patienten häufig zu Meniskus- und Knorpelschäden und sekundär zu degenerativen Veränderungen des Kniegelenkes. Aus diesem Grunde sollte ein insuffizientes vorderes Kreuzband beim aktiven Patienten durch ein autologes Sehnentransplantat ersetzt werden. Kreuzbandersatzplastiken erfordern jedoch lange Rehabilitationsphasen, die mit einem langen Trainingsausfall verbunden sind. Der durchschnittliche Aktivitätsgrad der Patienten kann durch eine Kreuzbandersatzplastik zwar signifikant

Summary

Rupture of the anterior cruciate ligament (ACL) is a serious knee injury that prohibits the athlete from competition and training. High risk sports for anterior cruciate ligament rupture are European team handball, basketball and soccer. Approximately 70 % of ACL injuries occur without direct contact to another player (non-contact situations). Various studies have shown that the most frequent situations are landing from a jump, stopping and plant and cut maneuvers. Video analysis of ACL ruptures have demonstrated that the knee joint was in slight flexion, valgus and external rotation. In this position, the ACL bears high loads and the muscular agonists of the ACL – the hamstrings muscles – have a poor lever arm to pull the tibia backwards. This causes a sudden contraction of the quadriceps muscles. A number of epidemiological studies has shown that the rate of ACL ruptures in female athletes is 2.4 to 9.5 times higher than in male athletes. It is unclear if hormonal or anatomical differences between males and females contribute to the different rate of ACL injuries. There is evidence that gender specific differences in coordination and neuromuscular control may be an explanation for the high incidence of ACL injuries in female athletes. Female athletes tend to be more upright with a slightly flexed knee when cutting and landing. The muscle mechanics in this position favors the quadriceps while denying a favorable position for the hamstrings to counteract the quadriceps. Women also have greater quadriceps activation. Therefore, when cutting, women place their knee in a position that favors a quadriceps-induced anterior drawer maneuver, placing the knee in a position of increased risk for ACL injury.

Key words: Injury mechanisms, non-contact injuries, prevention program, ball sports, anterior cruciate ligament (ACL)

gesteigert werden, dennoch bedeutet eine Kreuzbandverletzung für den betroffenen Sportler immer wieder das Ende einer Wettkampfkariere bedeuten (15). Für ein Wettkampfteam kann der Ausfall von einem oder mehreren Spielern Ranglistenplätze, häufig sogar auch den Klassenerhalt kosten. Daher muss die Verhinderung von Kreuzbandverletzungen oberstes Ziel von Trainern, Physiotherapeuten und Sportärzten sein.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Inzidenz von Kreuzbandrupturen bei weiblichen Athleten im Ballsport deutlich höher ist als bei Männern. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien durchgeführt, um Ursachen für die Geschlechtsunterschiede in der Inzidenz

von Kreuzbandverletzungen zu identifizieren – mit dem Ziel, aus diesen Erkenntnissen Präventionsstrategien zu entwickeln.

Ziel dieses Beitrages ist es, einen Literaturüberblick über Epidemiologie und Ursachen von Kreuzbandverletzungen im Ballsport zu geben. Im zweiten Teil werden die bisher bekannten Präventionsprogramme vorgestellt und diskutiert (63).

Epidemiologie

In den USA werden jedes Jahr etwa 75 000 Kreuzbandrupturen registriert (19). Diese Zahl entspricht einer Inzidenz von einer Verletzung auf 3 500 Einwohner. Etwa 70 % der Kreuzbandrupturen ereignen sich beim Sport in einem Lebensalter zwischen 15–45 Jahren. Für diesen Anteil der Bevölkerung liegt die Inzidenz bei etwa einer Verletzung auf 1 750 Einwohner (15); für die Altersklasse zwischen 15–25 Jahren liegt die Inzidenz bei 1/1 000.

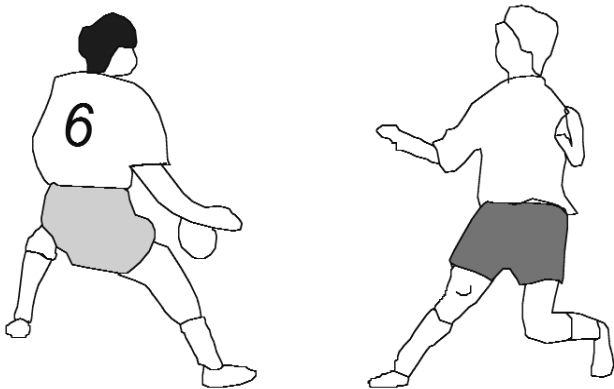


Abbildung 1: Typische Verletzungssituation für das vordere Kreuzband im Handball. Das Kniegelenk befindet sich zur Zeit der Verletzung in nur leichter Beugung, und Valgusposition. Der Unterschenkel ist außenrotiert. In dieser Knieposition ist die Spannung im vorderen Kreuzband am höchsten, und die muskulären Agonisten des vorderen Kreuzbandes, die ischiokruralen Muskeln, haben einen ungünstigen Hebelarm, um das Tibiaplateau zu sichern. Die Zeichnungen wurden nach Videoanalysen angefertigt

Am häufigsten kommen Kreuzbandrupturen in Sportarten mit Sprüngen und plötzlichen Drehbewegungen vor. Sportarten mit einer hohen Inzidenz sind Ballsportarten wie Handball, Basketball und Fußball. Ungefähr 70 % der Verletzungen entstehen jedoch ohne direkte Beteiligung eines Mitspielers in so genannten Nicht-Kontakt-Situationen (59).

Zahlreiche retrospektive Untersuchungen ergaben erste Hinweise, dass Kreuzbandverletzungen im Fußball, Basketball und Handball bei weiblichen Spielern häufiger vorkommen als bei männlichen. Dieses Phänomen wurde von Lindendorf et al. (38) erstmals prospektiv untersucht. Bei jugendlichen Fußballspielern war die Verletzungsrate weiblicher Spieler dreimal höher als die der männlichen Spieler (38). Auch nach Berichten der amerikanischen College-Sport-Vereinigung (NCAA) kommen Kreuzbandrupturen bei weiblichen Fußballspielern 2,4 mal häufiger und bei weiblichen Basketballspielern 4,2 mal häufiger vor (2).

Eine amerikanische Studie an High School-Basketballspielern hat gezeigt, dass weibliche Spielerinnen ein 3,79-fach höheres Risiko für das Erleiden einer Kreuzbandruptur haben als Männer. Bei norwegischen Handballspielerinnen war die Inzidenz von Kreuzbandverletzungen um den Faktor 5 im Vergleich zu männlichen Spielern erhöht (45). Strand et al. (58) ermittelten unter norwegischen Handballspielerinnen 0,82 Kreuzbandverletzungen auf 1 000 Spielstunden wobei 2/3 dieser Verletzungen Nicht-Kontakt-Verletzungen waren.

Nicht nur die Kreuzbandverletzungsrate ist bei weiblichen Sportlern erhöht. Wedderkopp et al. (61) ermittelten bei dänischen Handballspielerinnen Verletzungsraten zwischen 40,7 und 54,8 auf 1 000 Spielstunden. Rückraumspielerinnen hatten die höchste Verletzungsrate (61). Untersuchungen an deutschen Herrenmannschaften haben eine Verletzungsrate von 2,5 auf 1 000 Spielstunden ergeben (55).

Anatomische Risikofaktoren

Es gibt eine Vielzahl anatomischer Unterschiede an der unteren Extremität zwischen Männern und Frauen, die die geschlechtsspezifische Inzidenz an Kreuzbandrupturen erklären könnten. Bei Frauen ist die femorale Anteversion höher als bei Männern, und die Muskulatur ist schwächer entwickelt. Der Q-Winkel ist erhöht, und Frauen neigen zum Genu valgum (29).

Kontrovers wird im Schrifttum der Einfluss der Weite der Fossa interkondylaris auf die Entstehung von Kreuzbandverletzungen diskutiert. So soll die Weite der Fossa interkondylaris bei Patienten mit beidseitiger Kreuzbandruptur geringer sein als in einem Vergleichskollektiv mit einseitiger Kreuzbandruptur (53). Verschiedene Autoren haben beschrieben, dass die Weite der Fossa interkondylaris bei Frauen geringer ist als bei männlichen Athleten (43, 53). Der genaue Mechanismus, der bei enger Fossa interkondylaris zur Kreuzbandverletzung führt, ist unklar. Nach Angaben von Muneta et al. (43) soll bei enger Fossa interkondylaris ein Impingement am vorderen Rand der Fossa die Entstehung von Kreuzbandrupturen begünstigen; nach Angaben von Shelbourne (53) bedingt der kleinere Durchmesser der Fossa interkondylaris einen kleineren Kreuzbanddurchmesser und damit auch eine geringere Reißfestigkeit.

Die Weite der Fossa interkondylaris korreliert mit dem frontalen Durchmesser der Femurkondylen und ist abhängig von der Körpergröße. Aus diesem Grunde ist sie bei weiblichen Sportlern geringer als bei Männern. Da Basketballspielerinnen gewöhnlich größer als Fußballspielerinnen sind, müsste sich dieses Verhältnis auch in der Inzidenz von Kreuzbandrupturen widerspiegeln. Derartige Beobachtungen sind bisher allerdings nicht gemacht worden. Prospektive Studien zur Klärung der Beziehung von Kreuzbandrupturen und der Weite der Fossa interkondylaris fehlen jedoch. Aus diesem Grunde kann aus den anatomischen Daten zur Zeit keine Empfehlung hinsichtlich der Prävention ausgesprochen werden.

Hormonelle Risikofaktoren

Die Frage, ob die weiblichen Sexualhormone einen Einfluss auf die unterschiedlichen Verletzungsraten haben, wird im Schrifttum kontrovers diskutiert. Es ist lange bekannt, dass weibliche Geschlechtshormone Einfluss auf die Eigenschaften von Bindegewebe haben. An einem Rattenmodell konnte gezeigt werden, dass hohe Östrogenlevel die Kollagenmenge und den Fibrillendurchmesser signifikant reduzieren (23). Auch im Zellkulturmodell konnte durch hohe Östrogenkonzentrationen eine Reduktion der Kollagensynthese und Fibroblastenproliferation erzielt werden (39). Der Nachweis von Östrogen- und Progesteronrezeptoren auf Kreuzbandzellen führte zu der Vermutung, dass Struktur und biomechanische Eigenschaften des vorderen Kreuzbandes unmittelbar von den Sexualhormonen beeinflusst werden (39). Auch Rezeptoren für Relaxin konnten auf Kreuzbandzellen nachgewiesen werden.

Im Tiermodell (Kaninchen) konnte die Zugfestigkeit des vorderen Kreuzbandes durch sehr hohe Östrogengaben signifikant reduziert werden (56). Durch die Gabe physiologischer Östrogendosen (vergleichbar mit den Schwankungen während des weiblichen Zyklus) konnten die biomechanischen Bändeigenschaften jedoch nicht beeinflusst werden (7).

Auch die Untersuchungen am Menschen kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Karageanes et al. (33) untersuchten die Laxizität des vorderen Kreuzbandes mit dem KT 1 000 Arthrometer an 26 adolescenten weiblichen Athleten (14-18 Jahre) und kamen zu dem Ergebnis, dass der Menstruationszyklus die Kreuzbandlaxizität nicht beeinflusst. Romani et al. (51) testeten die Kniegelenksstabilität an 20 weiblichen Probanden (18-40 Jahre) mit dem KT 2 000 Arthrometer und bestimmten gleichzeitig die Hormonkonzentration im Serum. In dieser Studie bestand eine signifikante Korrelation zwischen der Östrogen- und Progesteronkonzentration und der Kreuzbandlaxizität. Heitz et al. (24) konnten ebenfalls zeigen, dass bei jungen Frauen (Alter 21-32) die Kreuzbandlaxizität während der Ovulations- und Lutealphase steigt, wenn die Östrogenkonzentration am höchsten ist. Einerseits könnte eine erhöhte Bandlaxizität protektiv auf das Kreuzband wirken, da es eher zur Elongation als zur Ruptur kommt. Andererseits könnte die propriozeptive Rückkopplung über die im Kreuzband vorhandenen Nocizeptoren durch die erhöhte Laxizität negativ beeinflusst werden.

Angaben im Schrifttum zur Beantwortung der Frage, ob es zu bestimmten Zeiten des weiblichen Zyklus' gehäuft zu Kreuzbandrupturen kommt, sind ebenfalls widersprüchlich. Myklebust et al. (45) berichten, dass während des Östrogenanstieges in der Mitte des weiblichen Zyklus' signifikant weniger Kreuzbandverletzungen auftreten als in anderen Phasen. Im Gegensatz dazu beobachteten Wojtys et al. (62) zwischen dem 10. und 14. Zyklustag eine signifikante Zunahme der Kreuzbandverletzungen. Über den Einfluss oraler Kontrazeptiva auf Kreuzbandverletzungen gibt es keine Angaben. Möller-Nielsen et al. (42) konnten jedoch zeigen, dass die In-

zidenz allgemeiner Kniedistorsionen durch die Einnahme oraler Kontrazeptiva signifikant reduziert werden konnte. Es ist unklar, ob dieser Effekt durch eine Beeinflussung des Bindegewebes oder durch eine hormonelle Beeinflussung des neuromuskulären Systems bedingt ist.

Verletzungsmechanismen

Videoanalysen von Kreuzbandverletzungen im Basketball haben Aufschluss über die Verletzungsmechanismen gebracht (11, 59). Nach diesen Studien entstehen Verletzungen des vorderen Kreuzbandes überwiegend ohne direkte Einwirkung des Gegners; 72 %-95 % der Kreuzbandrupturen entstehen in so genannten Nicht-Kontakt-Situationen (11, 44, 45).

Nach Angaben von Teitz (59) sind die gefährlichsten Spielsituationen:

1. das Landen nach einem Sprung
2. das plötzliche Abstoppen
3. plötzliche Drehbewegungen.

In dieser Studie wurden Videobänder aus verschiedenen Ballsportarten mit weiblichen und männlichen Athleten analysiert. Eine norwegische Studie an Handballspielerinnen identifizierte zwei Hauptmechanismen:

1. Plötzliche Drehbewegungen (plant and cut maneuver, 12 von 20 Verletzungen)
2. Das einbeinige Landen nach einem Sprung (4 von 20 Verletzungen) (48).

Die Körperhaltung zum Zeitpunkt der Verletzung war in beiden Studien aufrecht mit leicht flektiertem Knie- und Hüftgelenk (5°-25° Knieflexion; Abb. 1). Das Bein wurde mit 80-100 % des belastet. Der Unterschenkel war in den meisten Fällen außen- oder innenrotiert und in Valgusposition, eine Stellung in der das vordere Kreuzband maximal gespannt ist. Außerdem kann es zu einem Impingement von vorderem Kreuzband und lateralem Femurcondylus kommen. Die meisten Sportler berichteten, dass die Schuhsohle zum Zeitpunkt der Verletzung am Boden fixiert und eine Drehung des Fußes nicht möglich war. Der Körperschwerpunkt war in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle hinter dem Zentrum des Kniegelenkes und der Fuß wurde flach aufgesetzt (59).

Auch im Skisport ist die Inzidenz von Rupturen des vorderen Kreuzbandes (VKB) bei weiblichen Athletinnen um den Faktor 3,1 erhöht (18). Hier entsteht der Großteil der VKB-Verletzungen in einer Situation, in der das Kniegelenk stark flektiert ist, sich der Körperschwerpunkt hinter dem Knie befindet und der Unterschenkel innenrotiert ist (Abb. 2). Dieser Mechanismus ist im Schrifttum auch als „Phantomfußmechanismus“ bekannt (18).

In dieser Position bewirkt eine Kontraktion des M. quadriceps femoris hohe Spannungen im vorderen Kreuzband, und die ischiokruralen Muskeln haben einen

ungünstigen Hebelarm, um das vordere Kreuzband zu schützen. Außerdem muss in dieser Position die Hüfte gebeugt werden, um das Gleichgewicht zu halten; dabei kommt es zur starken Anspannung des M. quadrizeps. Colby et al. (13) konnten mittels Oberflächen-EMG zeigen, dass diese Bewegungen mit einer starken Quadrizepsaktivierung verbunden sind. Die Aktivität der ischiokruralen Muskeln war dagegen gering (13).

Diese Mechanismen können als Erklärung für die hohe Inzidenz an Kreuzbandrupturen bei weiblichen Ballspielern dienen. Bewegungsanalysen haben gezeigt, dass Frauen nach einem Sprung aufrechter landen als Männer mit einem weniger gebeugten Knie- und Hüftgelenk (16), ferner halten weibliche Sportler das Knie vermehrt in Valgusposition. Auch bei Drehbewegungen haben Frauen eine aufrechtere Körperhaltung. Die Muskelmechanik begünstigt in dieser Position den M. quadrizeps. Zusätzlich ist der Hebelarm der ischiokruralen Muskulatur, die den Tibiakopf nach vorne sichert, verkürzt. Frauen erreichen bei der Landung nach einem Sprung einen durchschnittlichen Kniebeugewinkel von 17°; Männer erreichen einen Kniebeugewinkel von durchschnittlich 31° (37). Nach dem Bodenkontakt beim Landen erreichen Frauen den maximalen Kniebeugewinkel deutlich schneller als Männer. Auf diese Weise werden die Kräfte nach einem Sprung bei weiblichen Sportlern abrupter absorbiert als bei Männern (37). Chappell et al. (12) untersuchten das Sprungverhalten weiblicher und männlicher Sportler bei Stop-Sprüngen mittels Videoanalyse und Kraftmessplatte. Auch diese Untersuchungen zeigten, dass Frauen mit geringerem Kniebeugewinkel und in größerer Valgusstellung landen als Männer. In dieser Position kam es zu höheren vorderen Scherkräften, die das vordere Kreuzband unter Stress setzen können.

Die Rolle der Quadrizepsmuskulatur

Grood et al. (20) haben an Kniegelenken von Körperspendern gezeigt, dass eine Anspannung der Ansatzsehne des M. quadrizeps in allen Stellungen des Gelenkes zu einer Anspannung von Fasern des vorderen Kreuzbandes führt. Die Kräfte im vorderen Kreuzband nahmen mit abnehmender Beugung zu. Die Kräfte, die durch den M. quadrizeps im Kreuzband erzeugt werden, sind abhängig von der resultierenden Kraft, die den Tibiakopf nach vorn zieht. Diese Resultierende ist wiederum abhängig vom Winkel zwischen Patellarsehne und Tibiaschaft (34). Mit abnehmender Beugung soll sich die Resultierende, die den Tibiakopf nach vorne zieht, erhöhen (34). Auf diese Weise können bei einer exzentrischen Quadrizepskraft von 6 000 N Kräfte bis zu 2 000 N im vorderen Kreuzband entstehen (34). Diese Kräfte sind hoch genug, um ein vorderes Kreuzband zu zerreißen (20). De Morat et al. (14) simulierten an 13 Kniegelenken von Körperspendern eine Quadrizepskraft von 4 500 N in 20° Knieflexion. In 6 Kniegelenken kam es zur makroskopisch sichtbaren Ruptur des vorderen Kreuzbandes. In den übrigen Gelenken kam es zur Elongation.

Renström et al. (50) konnten zeigen, dass der Zug des M. quadrizeps femoris die Spannung im vorderen Kreuzband bei Kniewinkeln zwischen 0° und 45° deutlich steigerte.

Diese Befunde stehen in Einklang mit Kraftmessungen im vorderen Kreuzband (40). Experimentell konnte durch Zug am Ligamentum patellae (200 N) bereits bei 50° Flexion eine messbare Kraft im vorderen Kreuzband erzeugt werden (40). Mit zunehmender Streckung erhöht sich die im Band gemessene Kraft bis auf circa 207 N in voller Streckung (40). Diese Befunde konnten durch Spannungsmessungen über ein arthroskopisch implantiertes Messgerät bestätigt werden (10). Passive Kniebewegungen bewirkten nur eine geringe Spannungszunahme im vorderen Kreuzband. Bei Kontraktion des M. quadrizeps femoris kam es zwischen 10° und 48°-Flexion zu sehr hohen Spannungen.

Bewegungsanalysen haben gezeigt, dass sich das Kniegelenk während des Aufsetzens des Fußes bei den so genannten Risikomanövern (Landen nach einem Sprung, plötzliches Abstoppen, plötzliche Drehbewegungen) in einem durchschnittlichen Beugewinkel von 22° befindet (13). In dieser Gelenkstellung wird das vordere Kreuzband maximal belastet. Hinzu kommt, dass es sich beim Landen nach einem Sprung oder auch bei Richtungswechseln um eine exzentrische Quadrizepsaktionen handelt. Verschiedene Autoren konnten zeigen, dass bei exzentrischen Kontraktionen höhere Kräfte entstehen als bei konzentrischen (17).

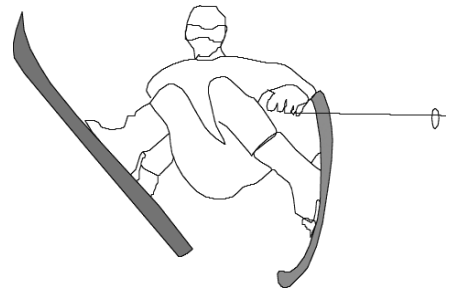


Abbildung 2: Schematische Darstellung des typischen Kreuzbandverletzungsmechanismus' im Skisport. Nachgezeichnet nach (18)

Protektiver Effekt der ischiokruralen Muskulatur

Die ischiokruralen Muskeln sind zweigelenkige Muskeln; sie extendieren die Hüfte und flektieren das Knie. Bei fixiertem Fuß sichern die ischiokruralen Muskeln den Tibiakopf gegen die Verschiebung nach vorn und gelten als Antagonisten zum M. quadrizeps (Abb. 1). Die vektorielle Zerlegung der auf die Tibia wirkenden Kräfte zeigt, dass die ischiokrurale Muskulatur mit zunehmender Streckung ihre Wirksamkeit verliert, den Tibiakopf zu sichern. Außerdem wird die Kraftentfaltung der ischiokruralen Muskeln durch die Stellung des Hüftgelenkes beeinflusst. Bei gestrecktem Hüftgelenk werden sie weniger vorge-dehnt und damit passiv insuffizient.

Propriozeption, neuromuskuläre Kontrolle und funktionelle Stabilität

Bei Tätigkeiten des täglichen Lebens entstehen im Kniegelenk Kräfte des ein- bis zweifachen Körpergewichtes.

Im Sport werden Kräfte des 5-fachen Körpergewichtes erreicht. Biomechanische Studien haben gezeigt, dass der Bandapparat diese Kräfte allein nicht halten kann (1, 6, 19, 20). In der Sagittalebene kann die ischiokrurale Muskulatur ein Abweichen der Tibia nach vorn verhindern (vordere Schublade). Der M. quadrizeps wirkt dieser Kraft entgegen. Die Fähigkeit das Gelenk über das Zusammenspiel beider Muskelgruppen mit den passiven Stabilisatoren zu stabilisieren, wird als funktionelle Stabilität bezeichnet. Muskelaktivierung kann bewusst oder unbewusst erfolgen (36).

Um ein Band zu schützen und somit eine Verletzung zu verhindern, ist neben Kraft und Wirkungsgrad auch die Zeit, in der ein Muskel seine Kraft entfaltet, von entscheidender Bedeutung. Die Zeit zwischen Stimulus (Unfall) und Aktionspotential wird als Muskelreaktionszeit oder Latenzzeit bezeichnet (36).

Der Begriff „neuromuskuläre Kontrolle“ bezeichnet die unbewusste Aktivierung von dynamischen Stabilisatoren eines Gelenkes auf mechanische Stimuli. Propriozeption (afferente Informationen über die Stellung des Gelenkes) ist die sensorische Quelle für Informationen, die die neuromuskuläre Kontrolle eines Gelenkes ermöglichen (36). Propriozeptive Informationen werden von verschiedenen Mechanorezeptoren gemeldet, die in Muskeln, Gelenken (Bändern und Kapsel) und in der Haut vorkommen (Abb. 3). Das vordere Kreuzband selbst enthält im Verankerungsbereich an Femur und Tibia sowie im subsynovialen Bindegewebe zahlreiche Mechanorezeptoren (22). Die Propriozeption in den Kreuzbändern hat für die Kinematik des Kniegelenkes große mechanische Bedeutung (3, 4, 5, 30, 31, 32). Patienten mit einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes haben deutliche Schwierigkeiten, die Stellung ihres Kniegelenkes wahrzunehmen (8). Es gibt zahlreiche Hinweise, dass die Propriozeptoren im vorderen Kreuzband als Sensoren für die Gelenkstellung dienen und auf diese Weise den Tonus und die Aktivität der stabilisierenden Muskeln steuern (60). Durch elektrische Stimulation des vorderen Kreuzbandes während einer Arthroskopie konnten z.B. EMG-Signale im M. biceps femoris und im M. semitendinosus erzeugt werden (60). Beide Muskeln gehören zur ischiokruralen Muskulatur und wirken agonistisch zum vorderen Kreuzband, indem sie die Tibia nach hinten ziehen. Diese Befunde stehen in Einklang mit Beobachtungen von Beard et al. (8), nach denen es beim Auslösen der „vorderen Schublade“ zur Anspannung der ischiokruralen Muskulatur kommt. Bei Patienten mit rupturiertem vorderen Kreuzband bleibt dieser Reflex aus.

Auf welcher Ebene dieser Kreuzbandreflex verschaltet ist, ist bisher unklar. Ein Teil der Informationen wird gleich auf spinaler Ebene weiterverarbeitet, ein weiterer Teil gelangt in das Zentralnervensystem, wo die Informationen überwiegend im Kleinhirn weiterverarbeitet werden. Hier werden außerdem Informationen des visuellen und vestibulären Systems gesammelt.

Die motorische Kontrolle erfolgt auf drei Ebenen: Spinale Reflexe, Hirnstamm-Kontrolle und kognitive Programme (36). Die Reflexaktivierung von afferenten α - oder γ -Moto-

neuronen durch Propriozeptoren spielt eine große Rolle für die neuromuskuläre Kontrolle. γ -Motoneurone kontrollieren über die Muskelspindelorgane die Steifheit des Muskels (36). Als Muskelsteifheit (Stiffness) wird das Verhältnis von Kraft zur Längenänderung bezeichnet (36). Je steifer ein Muskel, desto mehr Energie einer destabilisierenden Kraft kann er absorbieren. Da steifere Muskeln eine Last schneller auf die Spindelorgane übertragen können, wird auf diese Weise auch die elektromechanische Verzögerung reduziert. Durch Voraktivierung kann die Steifigkeit schon vor Einsetzen eines destabilisierenden Auslösers helfen, das Knie zu schützen.

Geschlechtsspezifische neuromuskuläre, propriozeptive und kinematische Unterschiede

Geschlechtsspezifische Unterschiede in der Muskelkraft sind im Wesentlichen auf Unterschiede in der Muskelmasse zurückzuführen (9). Je mehr Kraft ein Muskel entfalten kann, desto besser kann er das entsprechende Gelenk schützen. Weiterhin gibt es Hinweise, dass auch effektivere kontraktile Eigenschaften die geschlechtsspezifischen Kraftunterschiede bedingen (35).

Rozzi et al. (52) haben gezeigt, dass weibliche Sportler eine höhere Gelenklaxizität als männliche Sportler aufweisen und gleichzeitig einen schlechteren Gelenkstellungssinn besitzen. Diese Arbeitsgruppe zog aus diesen Befunden die Schlussfolgerung, dass eine hohe Gelenklaxizität verminderte propriozeptive Eigenschaften bedingt und das Knie auf diese Weise nicht vor schädigenden Kräften geschützt werden kann (52).

Auch die Aktivierung der das Kniegelenk stabilisierenden Muskeln weist geschlechts-spezifische Unterschiede auf. Weibliche Sportler scheinen sich hinsichtlich der Aktivierungsmuster der Kniegelenksmuskulatur von männlichen Sportlern zu unterscheiden. Huston und Woity's (27) beobachteten, dass weibliche Hochleistungssportler bei einer experimentellen vorderen tibialen Translation (Verletzungsreiz) mit einer Aktivierung des M. quadrizeps antworteten (Quadrizeps-Dominanz). Bei männlichen Sportlern sowie untrainierten Kontrollpersonen (weiblich und männlich) kam es zu einer Aktivierung der ischiokruralen Muskulatur. Hewett et al. (25) konnten zeigen, dass männliche Athleten die Knieflexoren beim Landen nach einem Sprung im Vergleich zu weiblichen Athleten signifikant schneller aktivieren. Biomechanische Analysen haben ergeben, dass auf diese Weise sehr hohe Bodenreaktionskräfte entstehen (25).

Die Befunde zu den geschlechtsspezifischen Unterschieden der neuromuskulären und propriozeptiven Funktionen dienen der Entwicklung von Präventionsstrategien zur Verhinderung von Kreuzbandverletzungen. Durch ein spezielles Sprungraining konnte die muskuläre Dysbalance zwischen M. quadrizeps und ischiokruraler Muskulatur beseitigt und die Aktivität der ischiokruralen Muskulatur gesteigert werden (25).

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass eine schnelle Aktivierung der ischiokruralen Muskulatur auf einen Verletzungsreiz einen wichtigen Beitrag zur funktionellen Sicherung des Kniegelenkes leistet (1, 6, 21, 28, 57).

Zusammenfassung

Geschlechtsspezifische neuromuskuläre Unterschiede sowie geschlechtsspezifische Bewegungsmuster in Risikosituationen sind wesentliche Faktoren für die hohe Inzidenz von Rupturen des vorderen Kreuzbandes beim weiblichen

Tabelle: Fazit für die Praxis

- Kreuzbandrupturen kommen im Ballsport bei weiblichen Sportlern etwa 2,4 bis 9,5 mal häufiger vor als bei Männern.
- 70 % der Verletzungen entstehen in Nicht-Kontakt-Situationen
- Verletzungssituation: Landung nach einem Sprung und während schneller Richtungswechsel.
- Stellung des Kniegelenkes: Leichte Beugung, in Valgus- und Außenrotationsstellung, Körperschwerpunkt hinter dem Kniegelenk
- Kontraktion des M. quadrizeps kann zur Ruptur des vorderen Kreuzbandes
- Frauen landen nach einem Sprung aufrechter mit einem nur wenig gebeugten Kniegelenk.
- Frauen sind häufig quadrizepsdominant. Andererseits gibt es Hinweise, dass die Bandlaxizität und die muskulotendinöse Steifigkeit durch geschlechtsspezifische hormonelle Unterschiede beeinflusst werden

Athleten. Inwieweit diese Unterschiede durch anatomische oder hormonelle Faktoren bedingt sind, ist unklar. Wahrscheinlich spielt beides eine Rolle. Die praktische Relevanz dieser Befunde liegt darin, dass durch eine systematische Modifikation dieser Bewegungsmuster Ansätze zur Prävention von Kreuzbandverletzungen gegeben sind.

Literatur

1. Aune AK, Ekeland A, Nordsletten L: Effect of quadriceps or hamstring contraction on the anterior shear force to anterior cruciate ligament failure: An in vivo study in the rat. *Acta Orthop Scand* 66 (1995) 261-265.
2. Arendt E, Dick R: Knee injury pattern among men and women in collegiate basketball and soccer: NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med* 23 (1995) 695-701.
3. Barrack RL, Skinner HB, Brunet ME, Cook SD: Joint laxity and proprioception in the knee. *Physician Sportsmed* 11 (1983) 130-135.
4. Barrack RL, Skinner HB, Brunet ME, Cook SD: Joint kinaesthesia in the thighly trained knee. *Am J Sports Med* 24 (1984) 18-24.
5. Barrack RL, Skinner HB, Buckley SL: Proprioception in the anterior cruciate ligament deficient knee. *Am J Sports Med* 17 (1989) 1-6.
6. Barrata R, Solomonow M, Letson D, Chuinard R, D'Ambrosia R: Muscular coactivation: The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *Am J Sports Med* 16 (1988) 113-122.
7. Belanger M, Moore DC, Mc Allister SC, Ehrlich MG: The mechanical properties of rat ACL are independent of serum oestrogen levels. *Trans Orthop Res Soc* 25 (2000) 151.
8. Beard DJ, Kyberd PJ, O'Connor JJ: Reflex hamstring contraction latency in anterior cruciate deficiency. *J Orthop Res* 12 (1994) 219-228.
9. Behm DG, Sale DG: Voluntary and evoked muscle contractile characteristics in active men and women. *Can J Appl Physiol*. 19 (1994) 253-265.
10. Beynon B, Howe J, Pope M, Johnson R, Fleming B: The measurement of anterior cruciate ligament strain in vivo. *Int Orthop* 16 (1992) 1-12.
11. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Garrett WE: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopaedics* 23 (2000) 573-578.
12. Chappell JD, Yu B, Kirkendahl DT, Garrett WE: A comparison of knee kinematics between male and female recreational athletes in Stop-jump tasks. *Am J Sports Med* 30 (2002) 261-267.
13. Colby S, Franciscos A, Yu B, Kirkendahl D, Finch M, Garret W: Electromyographic and kinematic analysis of cutting maneuvers. *Am J Sports Med* 29 (2000) 234-240.
14. DeMorat G, Weinhold P, Blackburn T, Chudik S, Garrett W: Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*, 32 (2004) 477-483.
15. Daniel DM, Stone ML, Dobson BE, Fithian DC, Rossman DJ, Kaufman KR: The fate of the ACL injured patient. A prospective outcome study. *Am J Sports Med* 22 (1994) 632-644.
16. Devita P, Skelly WA: Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Med Sci Sports Exerc* 24 (1992) 108-115.
17. Eloranta V, Komi PV: Function of the quadriceps femoris muscle under maximal concentric and eccentric contractions. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 20 (1980) 159-174.
18. Ettliger CF, Johnson RJ, Ehealy JE: A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing. *Am J Sports Med* 23 (1995) 531-537.
19. Garrick JG, Requa RK: Anterior cruciate ligament injuries in men and women: How common are they?, in: Griffin LY (Hrsg.): Prevention of non-contact ACL injuries, American Academy of Orthopaedic Surgeons. Rosemont, USA, 2000, 37-54.
20. Grood ES, Suntay WJ, Noyes FR, Bulter DL: Biomechanics of the knee-extension exercise: Effect of cutting the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am* 66 (1984) 725-735.
21. Hagood S, Solomonow M, Luo Z, D'Ambrosia R: The effect of joint velocity on the contribution of the antagonist musculature to knee stiffness and laxity. *Am J Sports Med*. 18 (1990) 182-187.
22. Halata Z, Haus J: The ultrastructure of sensory nerve endings in the human anterior cruciate ligament. *Anat Embryol* 179 (1989) 415-421.
23. Hama H, Yamamuro T, Takeda T: Experimental studies on connective tissue of the capsular ligament. Influence of sex hormones and ageing. *Acta Orthop Scand* 7 (1976) 21-27.
24. Heitz NA, Eisenman PA, Beck CL: Hormonal changes throughout the menstrual cycle and increased anterior cruciate ligament laxity in females. *J Athletic Training* 34 (1999) 144-149.
25. Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, Noyes FR: Plyometric training in female athletes: Decreased impact forces and hamstring torques. *Am J Sports Med* 24 (1996) 765-773.
26. Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, Noyes FR: The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes: A prospective study. *Am J Sports Med* 27 (1999) 699-706.
27. Huston LJ, Woitys EM: Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *Am J Sports Med* 24 (1996) 427-436.
28. Hirokawa S, Solomonow M, Baratta R, Zhou BH, D'Ambrosia R: Muscular cocontraction and control of knee stability. *J electromyogr Kinesiol* 1 (1996) 199-208.
29. Ireland ML: Anatomic risk factors, in: Griffin LY (Hrsg.): Prevention of noncontact ACL injuries. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Rosemont, USA, 2000, 67-79.
30. Jerosch J, Castro WHM, Hofstetter I, Bischof B: Propriozeptive Fähigkeiten bei Probanden mit stabilen und instabilen Sprunggelenken. *Dtsch Z Sportmed* 45 (1994) 380-389.
31. Jerosch J, Hofstetter I, Bork H, Bischof B: The influence of orthoses on the proprioception of the ankle joint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy* 3 (1995) 39-46.
32. Jerosch J, Pfaff G, Thorwesten L, Schoppe R: Auswirkungen eines propriozeptiven Trainingsprogrammes auf die sensomotorischen Fähigkeiten unteren Extremität bei Patienten mit einer vorderen Kreuzbandinstabilität. *Sportverl. Sportschad* 12 (1998) 121-130.
33. Karageanes SJ, Blackburn K: The association of the menstrual cycle with the laxity of the anterior cruciate ligament in adolescent female athletes. *Clin J Sport Med* 10 (2000) 162-168.
34. Kirkendahl DT, Garrett WE: Biomechanical considerations, in: Griffin LY (Hrsg.): Prevention of noncontact ACL injuries. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Rosemont, USA, 2000, 111-124.
35. Komi PV, Karlsson J: Skeletal muscle fibre types, enzyme activities and neuromuscular performance in young males and females. *Acta Physiol Scand* 4 (1978) 282-288.

36. *Lephart S, Riemann B*: The role of mechanoreceptors in functional joint stability, in: Griffin LY (Hrsg.). Prevention of noncontact ACL injuries. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Rosemont, USA, 2000, 125-136.
37. *Lephart S, Ferris CM, Riemann B, Myers JB, Fu F*: Gender Differences in strength and lower extremity kinematics during landing. Clin Orthop Rel Res 401 (2002) 162-169.
38. *Lindenfeld TN, Schmitt DJ, Henty MP, Mangine RE, Noyes FR*: Incidence of injury in indoor soccer. Am J Sports Med 22 (1994) 364-371.
39. *Liu SH, al Shaikh RA, Panossian V, Finerman GA*: Estrigen affects the cellular metabolism of the anterior cruciate ligament. Am J Sports Med 25 (1997) 704-709.
40. *Markolf KL, Gorek JF, Kobo JM, Shapiro MS*: Direct measurement of resultant forces in the anterior cruciate ligament: an in vitro study performed with a new experimental technique. J Bone Joint Surg 72-A (1990) 557-567.
41. *Messina DF, Farney WC, DeLee JC*: The incidence of injury in Texas high school basketball. A prospective study among male and female athletes. Am J Sports Med 27 (1999) 294-299.
42. *Möller-Nielsen J, Hammar M*: Sports injuries and oral contraceptive use: is there a relationship? Am J Sports Med 12 (1991) 152-160.
43. *Muneta T, Takaduda K, Yamamoto H*: Intercondylar notch width and its relation to configuration and cross sectional area of the anterior cruciate ligament: A cadaveric knee study. Am J Sports Med 25 (1997) 69-72.
44. *Myklebust G, Maehlum S, Holm I, Bahr R*: A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. Scand J Med Sci Sports 8 (1997) 149-153.
45. *Myklebust G, Maehlum S, Holm I, Bahr R*: A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. Scand J Med Sci Sports 8 (1998) 149-153.
46. *Myklebust G, Engeretsen L, Braekken IH, Olsen E, Bahr R*: Prevention of ACL injuries in female handball players: a prospective intervention study over three seasons. Lin J Sports Med, 13 (2003) 71-78.
47. *Nielsen AB, Yde J*: An epidemiologic and traumatologic study of injuries in handball. Int J Sports Med 9 (1988) 341-344.
48. *Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Bahr R*: Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball – a systematic video analysis. Am J Sports Med 32 (2004) 1002-1012.
49. *Petersen W, Tillmann B*: Anatomie des vorderen Kreuzbandes. Orthopäde 31 (2002) 710-718.
50. *Renström P, Arms SW, Stanwyck*: Strain within the anterior cruciate ligament during hamstring and quadriceps activity. Am J Sports Med 14 (1986) 83-87.
51. *Romani W, Curl LA, Lovering R*: The effect of endogenous estradiol levels at three phases of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament stiffness in active females. J Athl Train 2 (2003) 62.
52. *Rozzi SL, Lepart SM, Gear WS, Fu F*: Knee joint laxity and neuromuscular characteristics of male and female soccer and basketball players. Am J Sports Med 27 (1999) 312-319.
53. *Shelbourne DK, Facebene WA, Hunt JJ*: Radiographic and intraoperative intercondylar notch with measurement in men and women with unilateral and bilateral anterior cruciate ligaments tears. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 5 (1997) 229-233.
54. *Sheth P, Yu B, Laskowski ER, An KN*: Ankle disc training influences reaction times of selected muscles in a simulated ankle sprain. Am J Sports Med 25 (1997) 538-543.
55. *Seil R, Rupp S, Tempelhof S, Kohn D*: Sports injuries in team handball. A one-year prospective study of sixteen men's senior teams of a superior nonprofessional level. Am J Sports Med. 26 (1998) 681-687.
56. *Slauterbeck J, Clevenger C, Lundberg W, Burchfield DM*: Oestrogen levels alters the failure load of rabbit anterior cruciate ligament: J Orthop Res 17 (1999) 405-408.
57. *Solomonow M, Baratta R, Zhou BH*: The synergistic action of the anterior cruciate ligament and thigh muscles in maintaining joint stability. Am J Sports Med 15 (1987) 207-213.
58. *Strand T, Tyedte R, Engebretsen L, Tegnander A*: Anterior cruciate ligament injuries in handball playing. Mechanisms and incidence of injuries. Tidsskr Nor Laegeforen 30 (1990) 222-225.
59. *Teitz C*: Video analysis of ACL injuries, in: Griffin LY (Hrsg.): Prevention of noncontact ACL injuries. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Rosemont, USA, 2000, 89-100.
60. *Tsuda E, Yoshihisa O, Otsuka H, Komatsu T, Tokuya S*: Direct evidence of the anterior cruciate ligament reflex. Am J Sports Med 29 (2001) 83-87.
61. *Wedderkopp N, Kalthoff M, Lundgaard B, Rosendahl M, Froberg K*: Injuries in young female players in European team handball. Scand J Med Sci Sports 7 (1997) 342-347.
62. *Woitys EM, Huston LJ, Lindenfeld TN, Hewett TE, Greenfield ML*: Association between the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injuries in female athletes. Am J Sports Med 26 (1998) 614-619.
63. *Petersen W, Zantop T, Rosenbaum D, Raschke M*: Rupturen des vorderen Kreuzbandes bei weiblichen Athleten. Teil 2: Präventionsstrategien und Präventionsprogramme. Dtsch Z Sportmed 56 (2005) 157-164.

Korrespondenzadresse:

PD Dr. med. Wolf Petersen

Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie

Universitätsklinikum Münster

Waldeyerstr. 1

48149 Münster

E-mail: wolf.petersen@ukmuenster.de