

Arthroskopie 2023 · 36:281–286
<https://doi.org/10.1007/s00142-023-00614-1>
 Angenommen: 22. Mai 2023
 Online publiziert: 27. Juni 2023
 © Der/die Autor(en) 2023



Anterolaterale Rotationsinstabilität

Vorderes Kreuzband, anterolateraler Komplex oder lateraler Meniskus?

Lukas Willinger^{1,3} · Kiron K Athwal¹ · Sander Holthof¹ · Andreas B. Imhoff³ · Andy Williams^{1,2} · Andrew A Amis¹

¹ The Biomechanics Group, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London, Großbritannien

² Fortius Clinic, London, Großbritannien

³ Sektion Sportorthopädie, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München, München, Deutschland

Zusammenfassung

Hintergrund: Verletzungen des vorderen Kreuzbands (VKB), der Kaplan-Fasern (KF), der anterolateralen Kapsel/des anterolateralen Ligaments (C/ALL) und der posterioren Wurzel des lateralen Meniskus (LMPR) wurden getrennt voneinander mit anterolateraler Instabilität assoziiert. Ziel war es, die Bedeutung dieser Strukturen für die Kniestabilität zu untersuchen.

Methoden: Zehn fresh-frozen humane Kniekadaver wurden robotergestützt von 0° bis 90° Flexion getestet. Eine anterior-posteriore Kraft von 88 N, ein Innen-Außen-Rotationsdrehmoment von 5 N/m und ein Valgus-Varus-Drehmoment von 8 N/m wurden aufgebracht und die Kinematik des intakten Knies aufgezeichnet. Weitere 10 Kniegelenke wurden in einem Kinematikprüfstand mit optischem Tracking getestet, um die Knieelaxität nach sequenziellem Durchtrennen der o. g. Strukturen über 0° bis 110° Flexion zu messen.

Ergebnisse: Das VKB war der primäre Hemmer für die anteriore tibiale Translation (ATT); andere Strukturen waren unbedeutend (< 10 %). Die KF und C/ALL hemmten die Innenrotation (IR) und erreichten 44 % ± 23 % ($p < 0,01$) und 14 % ± 13 % ($p < 0,05$) bei 90°. Die LMPR hemmte die Valgus-, aber nicht die Innenrotation. Die ATT erhöhte sich bei VKB-Insuffizienz ($p < 0,001$) und nach der Durchtrennung der lateralen Strukturen von 70° auf 100° ($p < 0,05$). Die anterolaterale Rotationsinstabilität beim Pivot-Shift-Manöver wurde nach VKB-Durchtrennung von 0° auf 40° ($p < 0,05$) und weiter nach Durchtrennung der lateralen Strukturen von 0° auf 100° ($p < 0,01$) erhöht.

Schlussfolgerung: Der anterolaterale Komplex fungiert als funktionelle Einheit und sorgt für Rotationsstabilität. Das VKB ist der primäre Stabilisator für die ATT. Die KF sind der wichtigste Hemmer der IR ab 30° Flexion. Eine kombinierte Verletzung der KF mitsamt der C/ALL erhöhte die anterolaterale Rotationsinstabilität beträchtlich, während eine isolierte Verletzung der KF oder C/ALL dies nicht tat. Eine LMPR-Insuffizienz verursachte keine signifikante Instabilität bei intaktem VKB.

Schlüsselwörter

Anterolaterales Ligament · Kaplan-Fasern · Meniskuswurzel · Kinematik · Instabilität

Dieser Beitrag ist die leicht modifizierte und gekürzte deutschsprachige Version des bereits publizierten Artikels: Willinger L, Athwal KK, Holthof S et al. (2023) Role of the anterior cruciate ligament, anterolateral complex, and lateral meniscus posterior root in anterolateral rotatory knee instability—a biomechanical study. *Am J Sports Med* 51(5):1136–1145.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Rupturen des vorderen Kreuzbands (VKB) gehen häufig mit Verletzungen des anterolateralen Komplexes einher. Dies betrifft die Kapsel mitsamt des anterolateralen Ligaments (C/ALL) in 51–76 % der Fälle, die Kaplan-Fasern (KF) in 19–85 %

und die posteriore Wurzel des lateralen Meniskus (LMPR) in 30–40 % [1–5]. Diese Begleitverletzungen sind mit einem höheren Grad an anterolateraler Knieinstabilität und dem Pivot-Shift-Phänomen verbunden [6–9]. Verletzungen der KF, des fe-

moralen Ansatzes der kapselknöchernen Schicht des iliotibialen Bands (ITB), des C/ALL und des LMPR wurden jeweils mit einer erhöhten anterolateralen Knieinstabilität in Verbindung gebracht, sowohl klinisch als auch in vitro [10–13].

Eine persistierende anterolaterale Rotationsinstabilität des Knies (ALRI) steht in Zusammenhang mit schlechteren klinischen Ergebnissen und vermindertem Return-to-Sport [14, 15]. Daher hat sich das Behandlungsparadigma bei VKB-Verletzungen dahingehend geändert, dass nicht nur das vordere Kreuzband selbst behandelt wird, sondern auch periphere Kapsel- und Meniskusverletzungen sorgfältiger gesucht und operiert werden. Biomechanische Studien zeigen, dass anterolaterale Verfahren bei kombinierten Verletzungen zu einer besseren Wiederherstellung der Kniekinematik beitragen können als eine isolierte VKB-Rekonstruktion [16, 17]. Klinisch spiegelt sich dies in einer geringeren Revisionsrate und weniger sekundären Meniskuläsionen wider [18, 19]. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Beiträge der einzelnen Strukturen zur Kniestabilität zu ermitteln (d.h. wie stark jede Struktur die tibiofemorale Subluxation einschränkt) und ihren Einfluss auf die Knieinstabilität zu quantifizieren (d.h. wie stark die Laxität des tibiofemorales Gelenks nach einer Verletzung über die intakten Werte hinaus zunimmt).

Die Ziele dieser Studie waren daher die Quantifizierung der relativen Beiträge von VKB, C/ALL, KF und LMPR zur translatorischen und rotatorischen Stabilität des Knies und Messung der Zunahme der translatorischen und rotatorischen Knieinstabilität nach Durchtrennung von VKB, C/ALL, KF und LMPR.

Die Hypothesen waren, dass das VKB die anteriore tibiale Translation (ATT) am stärksten einschränkt, während die KF die Innenrotation (IR) am stärksten hemmen. Des Weiteren sollte es zu einem signifikanten Anstieg der ATT nach Durchtrennung des VKB kommen und die IR sowie der simulierte Pivot-Shift (SPS) nach Durchtrennung der KF am meisten steigen.

Material und Methoden

Insgesamt wurden 20 humane Kadaverknie mit einem durchschnittlichen Alter von 57 Jahren (47–65 Jahre) für diese Studie verwendet. Zehn Knie wurden zur Untersuchung der Bedeutung der einzelnen Strukturen für die Kniegelenkstabilität herangezogen und in einem Roboter-Setup getestet. Der passive Weg eines jeden Knies wurde zwischen 0° und 90° Flexion identifiziert, um den geringsten Widerstand der Bewegung festzulegen. Aus dieser Position wurden anschließend 88 N anteroposteriore Translation, 5 Nm Innen- und Außenrotation sowie 8 Nm Valgus-Varus-Rotation aufgebracht und die entsprechende Knie laxität in 0°, 30°, 60° und 90° Flexion aufgezeichnet. Die Knie laxität des intakten Knies diente als Ausgangswerte für die Messungen nach Durchtrennung der einzelnen Strukturen. Die zu testenden Kniestrukturen (VKB, KF, C/ALL und LMPR) wurden in variabler Reihenfolge durchtrennt und die Reduktion der hemmenden Kräfte dokumentiert. Die Verringerung der Kräfte entsprach der Bedeutung der zuvor durchtrennten Struktur.

» Der simulierte Pivot-Shift bestand aus einer Kombination von 5 Nm IR und 8 Nm Valgusrotation

Die Kniekinematik wurden an 10 weiteren Knien an einem 6-DOF-Testapparat zwischen 0° und 110° Flexion getestet. Um die Kinematik zu messen, wurden hierfür auch die gleichen Kräfte und Momente wie im Roboter-Testsetup auf die freihängende Tibia aufgebracht. Der simulierte Pivot-Shift (SPS) bestand aus einer Kombination von 5 Nm IR und 8 Nm Valgusrotation. Die anteriore tibiale Translation und tibiale Innenrotation wurde durch optisches Tracking (Polaris Kamera System, NDI) aufgenommen. One- and 2-way ANOVA mit Bonferroni-Korrektur wurden verwendet, um eine Signifikanz ($p < 0,05$) für die Roboter- und Kinematiktests zu berechnen.

Ergebnisse

Anteriore tibiale Translation

Das VKB war die einzige Struktur, welche die ATT von 0° bis 90° Beugung signifi-

kant zurückhielt ($p < 0,001$). Dies reichte von 94% des gesamten Widerstands der untersuchten Strukturen bei 0° Beugung bis zu 88% bei 90° Beugung. Keine der anderen Strukturen hemmte die ATT in signifikanter Weise; den größten Beitrag leisteten die KF, die bei 60° und 90° Beugung 7% des Rückhalts lieferten (nicht signifikant).

Die Durchtrennung des VKB verursachte eine signifikante anteriore Translationsinstabilität über den gesamten Flexionsbereich ($p < 0,001$), bis zu 9 mm bei 20° Flexion. Die Durchtrennung einzelner lateraler Strukturen (KF, C/ALL oder LMPR) erhöhte die ATT nicht signifikant über die VKB-defiziente Instabilität hinaus, aber die kombinierte Durchtrennung aller dieser Strukturen erhöhte die ATT zwischen 70° und 100° Flexion um bis zu 4 mm ($p < 0,05$).

Tibiale Innenrotation

Die IR wurde hauptsächlich von den KF zurückgehalten und erreichte $44\% \pm 23\%$ bei 90° Beugung, gefolgt von C/ALL mit $14\% \pm 13\%$ bei 90°. Die KF waren bei 60° und 90° Kniebeugung signifikant widerstandsfähiger als die C/ALL ($p < 0,05$). Das VKB hemmte die IR bei 0° Kniebeugung, war aber bei höherer Beugung unbedeutend. Die LMPR war kein signifikanter Hemmfaktor für die IR in einem VKB-intakten Knie (■ Abb. 1).

Die IR wurde bei keinem Beugewinkel durch die isolierte Durchtrennung des VKB signifikant erhöht. Die zusätzliche Durchtrennung der anterolateralen Strukturen führte im Vergleich zur isolierten VKB-Durchtrennung ab 70° Kniebeugung zu einer signifikanten IR-Instabilität. Das kombinierte defekte Knie (VKB + laterale Strukturen) hatte eine signifikant größere IR-Instabilität als das intakte Knie über 0° bis 100° Beugung (0° und 40–100°; $p < 0,01$; 10–30°, $p < 0,05$; ■ Abb. 2).

Simulierter Pivot-Shift

Anteriore Tibiatranslation. Die Durchtrennung des VKB führte zu einer signifikanten anterioren Translationsinstabilität während der SPS-Belastung von 0° bis 50° Flexion. Die Durchtrennung der lateralen Strukturen führte zu einem zusätzlichen signifikanten Anstieg der ATT-Instabilität

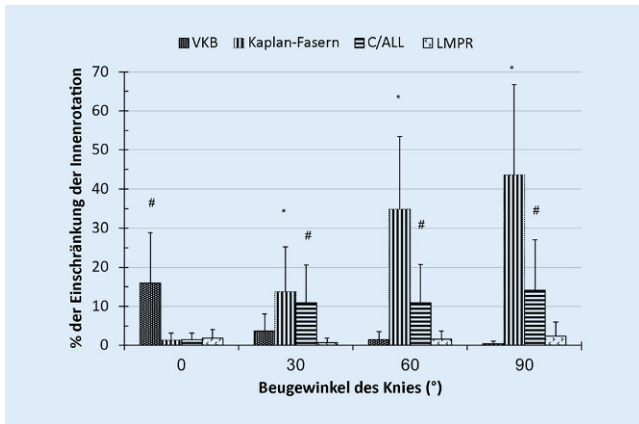


Abb. 1 ▲ Beitrag des vorderen Kreuzbands (VKB), der Kaplan-Fasern (KF), der anterolateralen Kapsel einschließlich des anterioren lateralen Ligaments (C/ALL) und der hinteren Wurzel des lateralen Meniskus (LMPR) zum Widerstand gegen die Innenrotation bei Robotertests (Raute $p < 0,05$, * $p < 0,01$). (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 10$)

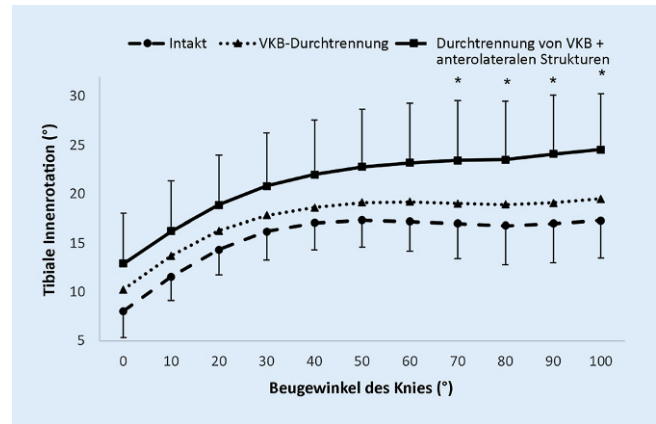


Abb. 2 ▲ Veränderungen der Innenrotation nach Durchtrennung des vorderen Kreuzbands (VKB) und dann auch der anterolateralen Strukturen als Reaktion auf ein Innenrotationsdrehmoment von 5 Nm in einem kinematischen 6-DOF-Test. (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 10$; * $p < 0,05$ signifikanter Anstieg gegenüber dem Zustand nach VKB-Durchtrennung)

von 10° bis 100° Beugung (▣ Abb. 3a; $p < 0,001$).

Innenrotation. Die Durchtrennung des VKB verursachte eine geringe IR-Instabilität (Mittelwert $< 2^\circ$) während der SPS-Belastung von 0° bis 40° Flexion. Die Durchtrennung der lateralen Strukturen verursachte eine größere Zunahme der IR-Instabilität, die von 10° bis 100° Flexion signifikant war und im Durchschnitt 7° über 50° bis 100° Flexion betrug; bis zu 5° dieser Zunahme folgten auf die Durchtrennung der KF. Das kombinierte verletzte Knie (VKB und laterale Strukturen) wies bei allen Flexionswinkeln eine signifikante IR-Instabilität auf, die bei 100° Flexion einen Anstieg von 8° über die native Laxität erreichte (▣ Abb. 3b).

Diskussion

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie waren, dass eine anterolaterale Instabilität bei simulierten Pivot-Shift-Tests nur dann zu beobachten ist, wenn sowohl die KF als auch die C/ALL durchtrennt sind. Bei isolierter Verletzung einer der beiden Strukturen, zeigte sich keine signifikante Erhöhung der ALRI, was darauf hindeutet, dass sie synergetisch wirken, um die anterolaterale Rotationsinstabilität (ALRI) zu hemmen. Die KF sind der wichtigste Hemmer für die tibiale IR in höheren Flexionsgraden. In ähnlicher Weise ist das VKB der primäre Hemmer für die ATT und

hemmt die IR nur streckungsnah. Die Ergebnisse zeigen unter Verwendung von robotergestützten und kinematischen Methoden in einer einzigen Studie, wie das VKB und die lateralen Strukturen über den gesamten Bewegungsbereich zusammenarbeiten, um dem Kniegelenk Stabilität zu verleihen.

Die Diskussion über die ALRI sorgt in der orthopädischen Fachwelt immer noch für lebhaft Diskussionen. Die Funktionen der anterolateralen Kniestrukturen wurden umfassend untersucht, aber die bisherigen Ergebnisse waren nicht konklusiv. Verletzungen der KF, des C/ALL und des LMPR wurden jeweils mit einer rotatorischen Instabilität in Verbindung gebracht, wobei verschiedene Autoren die eine oder andere Struktur als wichtiger erachteten [10, 12, 20, 21]. Einige Studien untersuchten in deren Versuchsaufbau nur eine Struktur, während die anderen nicht untersuchten Strukturen überbewerten könnten [1, 8, 22, 23]. Zumindest ein Teil dieser Kontroverse ist darauf zurückzuführen, dass nur Veränderungen der Knieinstabilität (Laxität, kraftkontrolliert) gemessen wurden, was klinisch beobachtet wird, aber nicht dasselbe ist wie die Bedeutung von Strukturen, welche die Gelenklaxität einschränken (wegkontrolliert) und die Stabilität des Knies gewährleisten.

Das VKB ist der primäre Hemmer für die ATT, was vorangegangene Studien bestätigen [12, 24]. Die Rolle des VKB bei der

Kontrolle der Rotationsinstabilität ist weniger gut erforscht: In früheren Studien wurde es als primärer Stabilisator der IR beschrieben [21, 25]. Es gibt jedoch immer mehr Belege dafür, dass das VKB bei der Kontrolle der IR nur eine untergeordnete Rolle spielt und vor allem bei voller Streckung wichtig ist [12, 26–29]. Die vorliegende Studie zeigt, dass das VKB maximal 16% des Widerstands gegen die IR beiträgt. Bei einer Beugung von 30° sind die anterolateralen Weichteile für den Widerstand gegen die IR wichtiger, und das VKB ist weniger bedeutend.

» Kaplan-Fasern (KF) sind der wichtigste Hemmer der tibialen Innenrotation (IR) über 30° Knieflexion

In der vorliegenden Studie waren die KF mit dem tiefen ITB der wichtigste Widerstand gegen IR von 30° bis 90° Flexion mit bis zu 44% bei 90° Flexion. Kittl et al. [12] untersuchten das oberflächliche und tiefe ITB getrennt und fanden einen höheren Beitrag des gesamten ITB zum Widerstand gegen IR bei 60° und 90° Flexion von 76% bzw. 72%. Diese Zahlen deuten auf eine signifikante IR-Instabilität hin, wenn das ITB isoliert verletzt ist; in Vorstudien wurde aber nur eine Zunahme von 1° bis 3° im gebeugten Knie berichtet [10, 20]. Diese IR-Veränderungen wären bei der klinischen Untersuchung schwer zu finden, was darauf hindeutet, dass die KF möglicherwei-

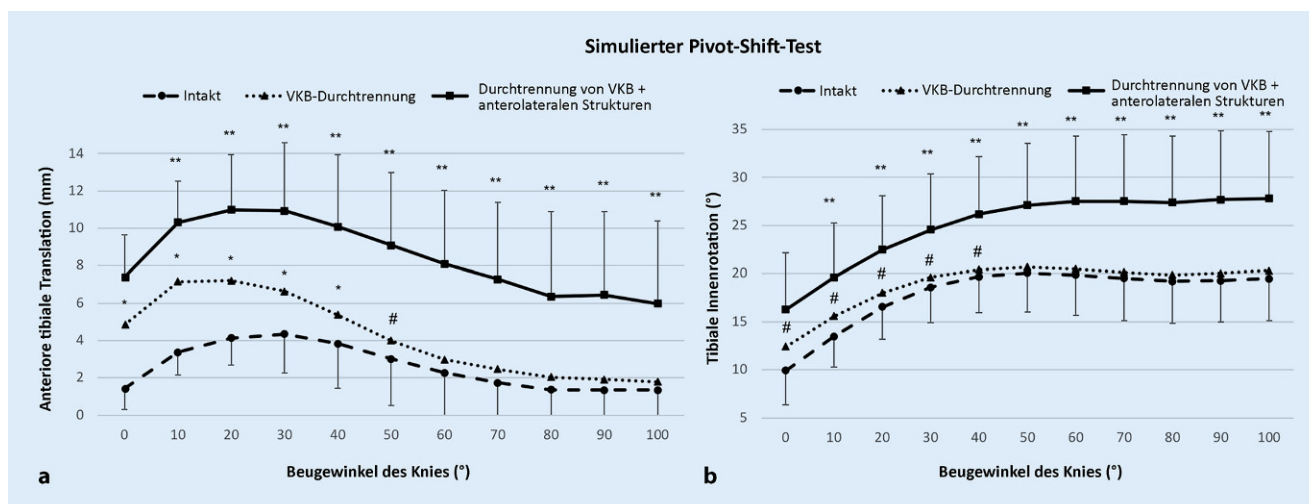


Abb. 3 ▲ Veränderungen der anterioren tibialen Translation (a) und Innenrotation nach Durchtrennung des vorderen Kreuzbands (VKB) und der anterolateralen Strukturen (b) als Reaktion auf eine simulierte Pivot-Shift-Belastung (kombiniertes internes Drehmoment von 5 Nm und Valgusdrehmoment von 8 Nm) in einem 6-DOF-Kinematik-Test. (* $p < 0,01$, Raute $p < 0,05$ im Vergleich zum intakten Zustand, ** $p < 0,001$ im Vergleich zum VKB-Insuffizienz-Zustand). (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 10$.)

se nicht isoliert geschädigt wären. Diese Studie zeigt, dass die ALRI nach Durchtrennung der KF erheblich zunimmt. Der Effekt verstärkt sich mit der Beugung des Knies und ist geringer, wenn die C/ALL intakt sind.

In Übereinstimmung mit einem früheren Bericht zeigt die vorliegende Studie, dass der C/ALL die IR weniger zurückhält als der KF/ITB [12]. Beide Studien ergaben, dass der C/ALL-Komplex 10–15 % des IR-Drehmoments von 30° bis 90° Beugung aufhält. Trotzdem gibt widersprüchliche Meinungen, inwieweit die C/ALL eine signifikante Rolle spielt. Bei einem VKB-intakten Knie führt eine C/ALL-Verletzung nicht zu einem signifikanten Anstieg der IR [20, 21, 30]; er ist also kein primärer Stabilisator. Bei VKB-defizienten Knien wurde über eine kleine, aber signifikante Auswirkung auf die IR nach Durchtrennung des C/ALL berichtet [10, 30–32]. Die vorliegende Studie unterstützt diese früheren Ergebnisse: Die Durchtrennung des C/ALL führt zu einem geringen Anstieg von ALRI und IR bei intakten KF und zu einem größeren Anstieg der IR-Instabilität, wenn die KF bereits durchtrennt wurden.

Diese Studie zeigt, dass der laterale Meniskus in einem VKB-intakten Knie die IR nicht hemmt, aber eine LMPR-Verletzung in einem VKB-defizienten Knie zu einem weiteren Anstieg der ALRI führt.

Frühere Kadaverstudien haben berichtet, dass eine laterale Menishektomie oder eine Durchtrennung des LMPR die IR- oder ALRI-Instabilität erhöht [1, 4, 8, 13, 22]. Diese Berichte beziehen sich jedoch auf VKB-defiziente Knie. Die Ergebnisse der vorangegangenen Studien stimmen mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit überein, wonach die IR geringfügig zunimmt, wenn das LMPR in einem VKB-defizienten Knie durchtrennt wird. In klinischen Studien wurden laterale Meniskusverletzungen mit einem höheren Grad an Instabilität bei Pivot-Shift-Belastung in Verbindung gebracht [4, 33, 34].

Die Studie muss in Zusammenschau ihrer Limitationen betrachtet werden. Die Ergebnisse beruhen auf Arbeiten an humanen Kadavern und sind daher nur begrenzt klinisch übertragbar. Die verwendeten Methoden beruhen jedoch auf umfangreicher Literatur, die die Gültigkeit der Verwendung von (1) frisch eingefrorenen kollagenen Geweben, (2) sequenziellen Schnittstudien zur Zurückhaltung in Robotertests und (3) kinematischen Messungen zur Messung der erhöhten Gelenkinstabilität belegt. Die Proben waren älter, als die für VKB-Verletzungen typisch ist, was ihr Verhalten beeinflussen könnte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass keine jüngeren Kadaver zur Verfügung standen, aber eine sorgfältige

Untersuchung stellte sicher, dass keine pathologischen Veränderungen vorlagen.

Außerdem handelte es sich beim *simulierten Pivot-Shift* um einen quasi-statischen Test und nicht um das dynamische klinische Manöver. Obwohl es sich um ein bewährtes Modell handelt, könnte ein dynamischer Testaufbau einen tatsächlichen Pivot-Shift besser nachbilden.

Schließlich bieten diese Ergebnisse zwar eine Begründung für chirurgische Eingriffe zur Behandlung verletzter lateraler Strukturen, doch wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, ob durch einen chirurgischen Eingriff die Stabilität auf dem Niveau des intakten Knies wiederhergestellt werden kann.

Fazit für die Praxis

- Der anterolaterale Komplex fungiert als funktionelle Einheit, um die Rotationsstabilität zu gewährleisten.
- Das vordere Kreuzband (VKB) ist der primäre Stabilisator für die anteriore tibiale Translation (ATT).
- Die Kaplan-Fasern (KF) sind der wichtigste Hemmer der Innenrotation (IR) über 30° Knieflexion.
- Eine kombinierte Verletzung der KF und der anterolateralen Kapsel/des anterolateralen Ligaments (C/ALL) erhöht die anterolaterale Rotationsinstabilität (ALRI) erheblich, während eine isolierte Verletzung der KF oder der C/ALL dies nicht tut.
- Verletzungen der posterioren Wurzel des lateralen Meniskus (LMPR) verursachen

keine signifikante Instabilität bei intaktem VKB.

Korrespondenzadresse



PD Dr. med. Lukas Willinger

Sektion Sportorthopädie, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München München, Deutschland
l.willinger@tum.de

Funding. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Diese Studie wurde durch eine Forschungsförderung der Gesellschaft für Arthroskopie und Gelenkchirurgie (AGA) finanziert. Sie wurde außerdem durch einen Zuschuss von Smith & Nephew Endoscopy Co. unterstützt, der auf ein Forschungskonto des Imperial College London überwiesen wurde. L. Willinger erhielt während seiner Tätigkeit am Imperial College London Mittel von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). K.K. Athwal, S. Holthof, A.B. Imhoff, A. Williams und A.A. Amis geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle beschriebenen Untersuchungen am Menschen oder an menschlichem Gewebe wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethikkommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Von allen beteiligten Patient/-innen liegt eine Einverständniserklärung vor.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Ma-

Anterolateral rotational instability. Anterior cruciate ligament, anterolateral complex or lateral meniscus?

Background: Injuries of the anterior cruciate ligament (ACL), Kaplan fibers (KF), anterolateral capsule/anterolateral ligament (C/ALL), and lateral meniscus posterior root (LMPR) have been separately linked to anterolateral instability. The aim was to investigate the importance of these structures for knee stability.

Methods: In this study 10 fresh-frozen human knees were robotically tested from 0° to 90° of flexion. An anteroposterior force of 88 N, an internal-external rotational torque of 5 N/m, and a valgus-varus torque of 8 N/m were applied and the kinematics of the intact knee were recorded. Another 10 knees were tested in a kinematics rig with optical tracking to measure knee laxity after sequentially severing the structures over 0°–110° of flexion.

Results: The ACL was the primary restraint for anterior tibial translation (ATT); other structures were insignificant (< 10%). The KF and C/ALL resisted internal rotation (IR), achieving 44 ± 23% ($p < 0.01$) and 14 ± 13% ($p < 0.05$) at 90°, respectively. The LMPR resisted valgus rotation but not IR. The ATT increased from 70° to 100° ($p < 0.05$) after ACL insufficiency ($p < 0.001$) and after severing the lateral structures. The pivot-shift maneuver increased anterolateral rotational instability after ACL transection from 0° to 40° ($p < 0.05$) and further after severing the lateral structures from 0° to 100° ($p < 0.01$).

Conclusion: The anterolateral complex acts as a functional unit to provide rotational stability. The ACL is the primary stabilizer for ATT. The KFs are the most important IR restraint above 30° of flexion. A combined KF and C/ALL injury substantially increased anterolateral rotational instability, while an isolated injury of the KF or C/ALL did not. An LMPR insufficiency did not cause significant instability with an intact ACL.

Keywords

Anterolateral ligament · Kaplan fibers · Meniscus root · Kinematics · Instability

terials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Forkel P, von Deimling C, Lacheta L, Imhoff FB, Foehr P, Willinger L et al (2018) Repair of the lateral posterior meniscal root improves stability in an ACL-deficient knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26(8):2302–2309
2. Helito CP, Helito PVP, Costa HP, Demange MK, Bordalo-Rodrigues M (2017) Assessment of the anterolateral ligament of the knee by magnetic resonance imaging in acute injuries of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 33(1):140–146
3. Herbst E, Hoser C, Tecklenburg K, Filipovic M, Dallapozza C, Herbolt M et al (2015) The lateral femoral notch sign following ACL injury: frequency, morphology and relation to meniscal injury and sports activity. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23(8):2250–2258
4. Musahl V, Rahnama-Azar AA, Costello J, Arner JW, Fu FH, Hoshino Y et al (2016) The influence of meniscal and anterolateral capsular injury on knee laxity in patients with anterior cruciate ligament injuries. *Am J Sports Med* 44(12):3126–3131
5. Balendra G, Willinger L, Pai V, Mitchell A, Lee J, Jones M et al (2021) Anterolateral complex injuries occur in the majority of 'isolated' anterior cruciate ligament ruptures. *Knee Surg Sports Traumatol*

Arthrosc 30(1):176–183. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06543-6>

6. Cavaignac E, Faruch M, Wytrykowski K, Constant O, Murgier J, Berard E et al (2017) Ultrasonographic evaluation of anterolateral ligament injuries: Correlation with magnetic resonance imaging and pivot-shift testing. *Arthroscopy* 33(7):1384–1390
7. Khanna M, Gupte C, Dodds A, Williams A, Walker M (2019) Magnetic resonance imaging appearances of the capsulo-osseous layer of the iliotibial band and femoral attachments of the iliotibial band in the normal and pivot-shift ACL injured knee. *Skeletal Radiol* 48(5):729–740
8. Musahl V, Citak M, O'Loughlin PF, Choi D, Bedi A, Pearle AD (2010) The effect of medial versus lateral meniscectomy on the stability of the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med* 38(8):1591–1597
9. Ueki H, Katagiri H, Otabe K, Nakagawa Y, Ohara T, Shioda M et al (2019) Contribution of additional anterolateral structure augmentation to controlling pivot shift in anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 47(9):2093–2101
10. Geeslin AG, Chahla J, Moatshe G, Muckenhirn KJ, Kruckeberg BM, Brady AW et al (2018) Anterolateral knee extra-articular stabilizers: A robotic sectioning study of the anterolateral ligament and distal iliotibial band Kaplan fibers. *Am J Sports Med* 46(6):1352–1361
11. Guenther D, Irrarazaval S, Bell KM, Rahnama-Azar AA, Fu FH, Debski RE et al (2017) The role of extra-articular tenodesis in combined ACL and anterolateral capsular injury. *J Bone Joint Surg Am* 99(19):1654–1660
12. Kittl C, El-Daou H, Athwal KK, Gupte CM, Weiler A, Williams A et al (2016) The role of the anterolateral

- structures and the ACL in controlling laxity of the intact and ACL-deficient knee. *Am J Sports Med* 44(2):345–354
13. Lording T, Corbo G, Bryant D, Burkhart TA, Getgood A (2017) Rotational laxity control by the anterolateral ligament and the lateral meniscus is dependent on knee flexion angle: a cadaveric biomechanical study. *Clin Orthop Relat Res* 475(10):2401–2408
 14. Ayeni OR, Chahal M, Tran MN, Sprague S (2012) Pivot shift as an outcome measure for ACL reconstruction: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20(4):767–777
 15. Tashman S, Collon D, Anderson K, Kolowich P, Anderst W (2004) Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 32(4):975–983
 16. Inderhaug E, Stephen JM, Williams A, Amis AA (2017) Anterolateral tenodesis or anterolateral ligament complex reconstruction: effect of flexion angle at graft fixation when combined with ACL reconstruction. *Am J Sports Med* 45(13):3089–3097
 17. Inderhaug E, Stephen JM, Williams A, Amis AA (2017) Biomechanical comparison of anterolateral procedures combined with anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 45(2):347–354
 18. Sonnery-Cottet B, Saithna A, Cavalier M, Kaje-tanek C, Temponi EF, Daggett M et al (2017) Anterolateral ligament reconstruction is associated with significantly reduced ACL graft rupture rates at a minimum follow-up of 2 years: a prospective comparative study of 502 patients from the SANTI study group. *Am J Sports Med* 45(7):1547–1557
 19. Sonnery-Cottet B, Saithna A, Blakeney WG, Ouanezar H, Borade A, Daggett M et al (2018) Anterolateral ligament reconstruction protects the repaired medial meniscus: a comparative study of 383 anterior cruciate ligament reconstructions from the SANTI study group with a minimum follow-up of 2 years. *Am J Sports Med* 46(8):1819–1826
 20. Huser LE, Noyes FR, Jurgensmeier D, Levy MS (2017) Anterolateral ligament and Iliotibial band control of rotational stability in the anterior cruciate ligament-intact knee: defined by tibio-femoral compartment translations and rotations. *Arthroscopy* 33(3):595–604
 21. Lipke JM, Janecki CJ, Nelson CL, McLeod P, Thompson C, Thompson J et al (1981) The role of incompetence of the anterior cruciate and lateral ligaments in anterolateral and anteromedial instability. A biomechanical study of cadaver knees. *J Bone Joint Surg Am* 63(6):954–960
 22. Shybut TB, Vega CE, Haddad J, Alexander JW, Gold JE, Noble PC et al (2015) Effect of lateral meniscal root tear on the stability of the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med* 43(4):905–911
 23. Smith PA, Bezold WA, Cook CR, Krych AJ, Stuart MJ, Wijdicks C et al (2021) Kinematic analysis of lateral meniscal oblique radial tears in the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med*. <https://doi.org/10.1177/03635465211052521>
 24. Ball S, Stephen JM, El-Daou H, Williams A, Amis AA (2020) The medial ligaments and the ACL restrain anteromedial laxity of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28(12):3700–3708
 25. Engebretsen L, Wijdicks CA, Anderson CJ, Westershaus B, LaPrade RF (2012) Evaluation of a simulated pivot shift test: a biomechanical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20(4):698–702
 26. Amis AA, Scammell BE (1993) Biomechanics of intra-articular and extra-articular reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* 75(5):812–817
 27. Andersen HN, Dyhre-Poulsen P (1997) The anterior cruciate ligament does play a role in controlling axial rotation in the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 5(3):145–149
 28. Lorbach O, Pape D, Maas S, Zerbe T, Busch L, Kohn D et al (2010) Influence of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament on external and internal tibiofemoral rotation. *Am J Sports Med* 38(4):721–727
 29. Oh YK, Kreinbrink JL, Ashton-Miller JA, Wojtys EM (2011) Effect of ACL transection on internal tibial rotation in an in vitro simulated pivot landing. *J Bone Joint Surg Am* 93(4):372–380
 30. Sonnery-Cottet B, Lutz C, Daggett M, Dalmay F, Freychet B, Niglis L et al (2016) The involvement of the anterolateral ligament in rotational control of the knee. *Am J Sports Med* 44(5):1209–1214
 31. Rasmussen MT, Nitri M, Williams BT, Moulton SG, Cruz RS, Dornan GJ et al (2016) An in vitro robotic assessment of the anterolateral ligament, part 1: secondary role of the anterolateral ligament in the setting of an anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 44(3):585–592
 32. Spencer L, Burkhart TA, Tran MN, Rezansoff AJ, Deo S, Catherine S et al (2015) Biomechanical analysis of simulated clinical testing and reconstruction of the anterolateral ligament of the knee. *Am J Sports Med* 43(9):2189–2197
 33. Hoshino Y, Miyaji N, Nishida K, Nishizawa Y, Araki D, Kanzaki N et al (2019) The concomitant lateral meniscus injury increased the pivot shift in the anterior cruciate ligament-injured knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27(2):646–651
 34. Hosseini A, Li JS, Gill TJ, Li G (2014) Meniscus injuries alter the kinematics of knees with anterior cruciate ligament deficiency. *Orthop J Sports Med* 2(8):2325967114547346