

W. Petersen¹, P. Forkel¹, A. Achtnich¹, S. Metzläff¹, T. Zantop²

Verletzungen des vorderen Kreuzbandes: Von der Prävention zur Therapie

Injuries of the anterior cruciate ligament: from prevention to therapy

Zusammenfassung: Das vordere Kreuzband (VKB) besteht aus zwei funktionellen Bündeln, die in unterschiedlichen Gelenkstellungen gespannt sind. Das anteromediale Bündel kommt in voller Streckung und in Beugung unter Spannung. Das posterolaterale Bündel ist nur strecknah gespannt und stabilisiert gegen die anteriore tibiale Translation in Neutralstellung und in Innenrotation (Pivot shift Phänomen). Eine symptomatische vordere Instabilität beeinträchtigt die Funktion des Kniegelenkes und kann langfristig bei „Nicht-Kompensieren“ zur Arthrose führen. Bei Patienten mit symptomatischer vorderer Instabilität kann die Arthroseentstehung durch eine VKB-Ersatzplastik mit einem autologen Sehnentransplantat verlangsamt werden. Neben der Instabilität ist für die postoperative Arthroseentstehung der Umfang initialer Begleitverletzungen (Meniskus, Knorpel) relevant.

Als Operationsverfahren sollten anatomische Techniken zur Anwendung kommen. Der häufigste Grund für eine Revision ist eine Fehlpositionierung der Knochentunnel. Als autologe Sehnentransplantate eignen sich die Patellarsehne, die Quadrizepssehne und die Semitendinosusehne. Alle Transplantate haben Vor- und Nachteile und spezielle Indikationen. Ziel der modernen Kreuzbandchirurgie ist eine patientenspezifische Transplantatwahl. Wichtig ist eine anatomische Kreuzbandrekonstruktion unter Berücksichtigung des Doppelbündelkonzeptes. Dieses beinhaltet auch den Partialersatz einzelner Bündel.

Schlüsselwörter: Prävention, Indikation, Kompensierer, Doppelbündelkonzept, patientenspezifische Transplantatwahl

Abstract: The anterior cruciate ligament (ACL) consists of two functional bundles which show reciprocal tension in different joint position. In full extension and in increased flexion the anteromedial bundle is tensioned. The posterolateral bundle is tensioned with increasing extension and it stabilizes against anterior tibial translation in internal rotation (Pivot shift phenomenon). A symptomatic anterior instability impairs the function of the knee joint and may lead to secondary osteoarthritis in patients who cannot cope the instability. Osteoarthritis may be prevented by ACL reconstruction in patients with a symptomatic instability. For the development of an osteoarthritis concomitant injuries such as meniscus and cartilage damage may be relevant.

For surgical reconstruction of the ACL anatomical techniques should be used. The most frequent cause of revision surgery is misplacement of the bone tunnels. The patellar tendon, quadriceps tendon or hamstring tendons are suitable autologous tendon grafts.

All grafts have advantages and disadvantages and specific indications. Aim of the modern ACL surgery is a patient specific graft choice. Gold standard is the anatomical ACL reconstruction with regard to the double bundle concept. This concept includes the partial replacement of single ruptured bundles.

Keywords: prevention, indication, copers, double bundle concept, patient specific graft choice

¹ Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Martin Luther Krankenhaus, Berlin Grunewald

² Sporthopaedicum Straubing

DOI 10.3238/oup.2012.0232-0243

Einleitung

Die Ruptur des vorderen Kreuzbandes ist eine folgenschwere Verletzung für das Kniegelenk. Sie kann zur Instabilität führen und den betroffenen Patienten unmittelbar in seiner (sportlichen) Aktivität beeinträchtigen. Langfristig kann eine unbehandelte symptomatische Instabilität zur Entwicklung einer posttraumatischen Osteoarthritis beitragen. Trotz der Vielzahl an Publikationen sind viele Fragen im Hinblick auf das vordere Kreuzband noch nicht gelöst oder werden in der Fachwelt kontrovers diskutiert.

In dem vorliegenden Übersichtsartikel möchten wir einen aktuellen Überblick über Epidemiologie, Prävention, Diagnostik und Therapie von Verletzungen des vorderen Kreuzbandes geben.

Anatomie und Biomechanik

Das vordere Kreuzband (VKB) besteht aus zwei funktionellen Bündeln [23–25, 39], einem anteromedialen (AM) und posterolateralen Bündel (PL). Beide Bündel zeigen ein unterschiedliches Spannungsverhalten (Abb.1). Das PL-Bündel spannt sich in Streckung an; das AM-Bündel kommt in Beugung unter Spannung. Auf diese Weise kann das Kniegelenk in verschiedenen Beugewinkeln gegen die anteriore tibiale Translation gesichert werden (Lastverteilung). Da das PL-Bündel seine Wirkung streckungsnahe entfaltet, leistet es außerdem einen wichtigen Beitrag für die Rotationssicherung des Kniegelenkes (Pivot shift Mechanismus) [39]. Dabei handelt es sich nicht um eine reine Rotation der Tibia sondern um eine anteriore Translation des lateralen Tibiaplateaus in Innenrotation und unter Valgusstress.

Epidemiologie und Unfallmechanismen

Die Häufigkeit der VKB-Ruptur liegt etwa bei 1/3500 Einwohner [9, 26, 27]. Als Ursache gelten Sportunfälle in Sportarten mit Sprüngen und plötzlichen Drehbewegungen (Handball, Basketball und Fußball). Auch im alpinen Skisport kommt es oft zu VKB-Rupturen [8].

Kreuzbandverletzungen kommen bei Sportlerinnen häufiger vor als bei

männlichen Sportlern [3, 4, 7, 9, 11, 17, 18, 26, 27].

Videoanalysen haben Aufschluss über die Verletzungsmechanismen gegeben [26]. Danach entstehen Verletzungen des vorderen Kreuzbandes überwiegend ohne direkte Einwirkung des Gegners; der überwiegende Anteil entsteht in Nicht-Kontakt-Situationen.

Die gefährlichsten Spielsituationen sind: 1. das Landen nach einem Sprung, 2. das plötzliche Abstoppen und 3. plötzliche Drehbewegungen.

Zwei Hauptmechanismen wurden identifiziert: 1. Plötzliche Drehbewegungen (plant and cut maneuver, 12 von 20 Verletzungen) und 2. das einbeinige Landen nach einem Sprung (4 von 20 Verletzungen) [47]. Die Körperhaltung zum Zeitpunkt der Verletzung ist aufrecht mit leicht flektiertem Knie- und Hüftgelenk (5° – 25° Knieflexion). Der Unterschenkel ist außen- oder innenrotiert und das Knie in Valgusposition (funktionelles Malalignment). Das ist eine Stellung, in der das vordere Kreuzband maximal gespannt ist. Der Körperschwerpunkt befindet sich hinter dem Zentrum des Kniegelenkes und der Fuß wird flach aufgesetzt. In dieser Position kommt es zu einer starken Anspannung des M. quadrizeps, die geeignet ist das VKB zu zerreißen. Die ischiokruralen Muskeln haben bei nur geringer Beugung einen ungünstigen Hebelarm, um das vordere Kreuzband zu schützen

Auch für den Skisport wurden Verletzungsmechanismen identifiziert. 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. Dieser Mechanismus ist im Schrifttum auch als „Phantomfußmechanismus“ bekannt [8].

Präventionsstrategien

Auf Grundlage dieser Beobachtungen wurden Strategien zur Prävention von Kreuzbandrupturen entwickelt [4, 7, 11, 28].

Dabei verfolgen die einzelnen Präventionsprogramme unterschiedliche Ansätze:

1. Aufklärung und Modifikation von gefährdenden Bewegungen (z.B. das

Henning Programm, Vermont ACL Prevention Programm),

2. Propriozeptionstraining,
3. Gezieltes Sprungtraining,
4. Kräftigungsübungen für die schützenden Kniebeuger (Russian Hamstrings) und
5. Übungen zur Stärkung der Hüftrotatoren und Rumpfstabilisierung. Diese Elemente sollten in einem Präventionsprogramm kombiniert werden.

Mit Sprungtests (Drop vertical jump Test) und einbeinigen Kniebeugen können Risikoathleten identifiziert werden, bei denen gezielt an einer Bewegungsmodifikation gearbeitet werden kann (Abb. 2).

Leider wird der Prävention von VKB-Rupturen in Deutschland nur eine untergeordnete Bedeutung beigemessen. Präventionsmaßnahmen sind zeitaufwendig. Daher ist die Bereitschaft der Trainer und Spieler gering, kostbare Trainingszeit dafür zu opfern. Hinzu kommt, dass der überwiegende Teil der Präventionsstrategien erst in den letzten Jahren entwickelt wurde und vielen Trainern, Sportärzten und Physiotherapeuten nicht bekannt sind.

Diagnostik

Klinische Untersuchung

Die VKB-Ruptur ist eine klinische Diagnose. Häufig findet man keine äußeren Verletzungszeichen. Bei frischer VKB-Ruptur besteht oft ein intraartikulärer Erguss, der sich in den Recessus suprapatellaris ausdehnt. Eine Punktion ist zu therapeutischen Zwecken selten erforderlich. Wir führen Punktionen durch, wenn ein schmerzhaftes Spannungsgefühl besteht. Ein Hämarthros ist ein wichtiger Hinweis auf eine VKB-Ruptur [30].

Klinische Funktionstests sind in der akuten Situation meist nicht durchführbar. Schubladenphänomene sind die klassischen Tests in der Kreuzbanddiagnostik. Leider lässt sich die vordere Schublade in 90° Beugung in der klinischen Praxis oft nicht ganz einfach beurteilen. Als sensitiver gilt der Lachman-Test (vordere Schublade in 20° – 30° Beugung), da in dieser Position der Hebelarm der ischiokruralen Muskulatur minimiert wird. Für wissenschaftliche Auswertungen oder Gutachten kann der

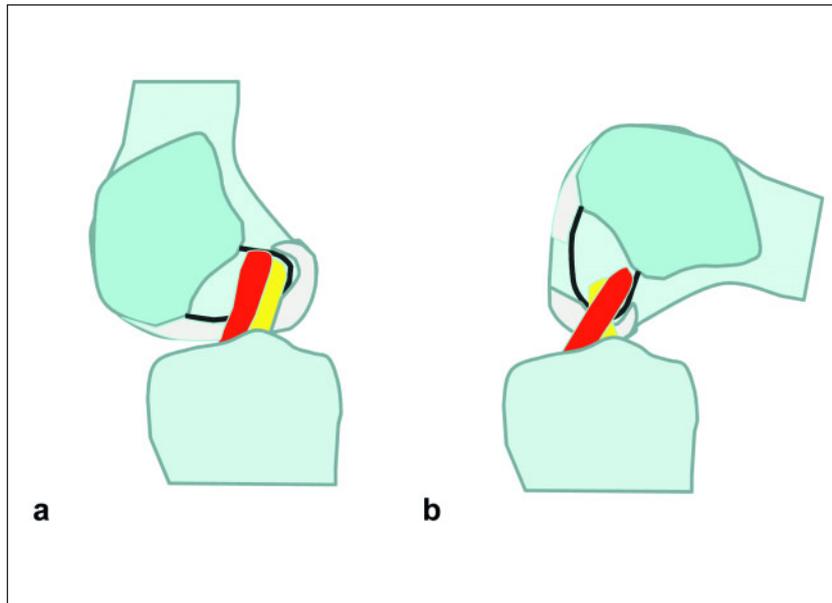


Abbildung 1 Das vordere Kreuzband besteht aus zwei funktionellen Bündeln: Das anteromediale Bündel (AM, rot) ist in Streckung und Beugung gespannt. Das posterolaterale Bündel (PL, gelb) spannt sich nur in Streckung an und trägt zwischen 0° und 30° zur Rotationsstabilität (Pivot shift) bei.



Abbildung 2 „Drop vertical jump“ Test zur Identifizierung von Athleten mit Bewegungsmustern, die ein Risiko für eine VKB-Ruptur darstellen. Weicht das Knie bei der Landung im Valgussinne ab, ist der Test positiv.

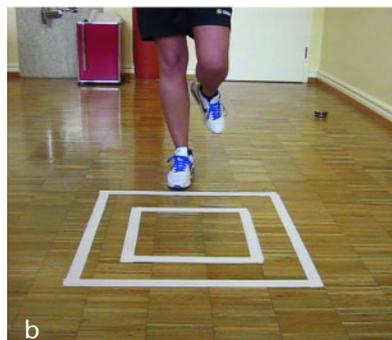
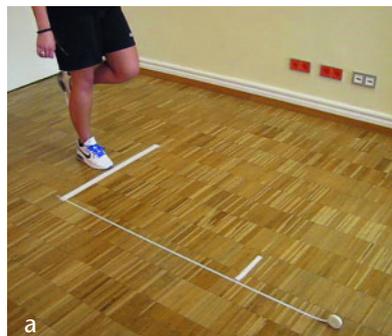


Abbildung 3 a) und b) Beispiele für zwei Einbeinsprungtests. Eine Sprungweite von < 90 % der Gegenseite weist auf eine funktionelle Instabilität hin.

Lachman-Test mit spezielle, Messgeräten objektiviert werden (KT 1000, Rolimeter).

Instabilitätsgefühle treten meist in Positionen auf, in denen sich das Kniegelenk in leichter Beugung befindet und der Fuß innenrotiert steht. Dieser Pathomechanismus kann mit dem dynamischen Subluxations-Tests erfasst werden (z.B. Pivot shift Phänomen, Jerk Test, Lose Test). Es ist bekannt, dass positive dynamische Subluxations-Tests nach operativer Stabilisierung mit schlechten postoperativen Ergebnissen korrelieren. Gemeinsam ist allen Subluxations-Tests, dass das Knie valgisiert und innenrotiert wird. Bei dieser Bewegung kommt es zwischen 30° Beugung und voller Streckung zu einer vorderen Subluxation der Tibia, die ab 30° Beugung durch den Zug des Traktur iliotalialis reponiert wird. Die Reposition imponiert als Schnappphänomen.

Für die funktionelle Diagnostik haben sich „Ein-Bein-Sprungtests“ etabliert. Diese Tests sollen ein Parameter für die funktionelle Stabilität des Kniegelenkes sein und die Fähigkeit zeigen, ob ein Patient die VKB-Ruptur funktionell kompensieren kann [6]. Abbildung 3 zeigt zwei typische Sprungtests. Aber auch der Drop vertical jump Test und einbeinige Kniebeugen als Risikotests für das Erleiden einer VKB-Ruptur gehören zu den diagnostischen Instrumenten.

Bildgebende Diagnostik

In der konventionellen Röntgendiagnostik gilt ein knöchernes anterolaterales Tibiafragment (Segond-Fragment) als pathognomonisch für eine Ruptur des vorderen Kreuzbandes. Im seitlichen Bild kann auch eine anteriore Delle im lateralen Femurcondylus Hinweis auf eine VKB-Ruptur sein. Auch ossäre Ausrisse sind im konventionellen Bild gut zu erkennen.

Die Magnetresonanztomographie gilt als sehr sensitive Methode zur Diagnostik von Bandläsionen und deren Begleitverletzungen. Stressreaktionen am Knochen (Bone bruise) lassen ferner Rückschlüsse auf den Unfallmechanismus zu. Die Sensitivität der MRT-Diagnostik der VKB-Läsion beträgt zwischen 92 und 100 %, die Spezifität beträgt zwischen 85 und 100 %. In Abhängigkeit von der Verletzungs-

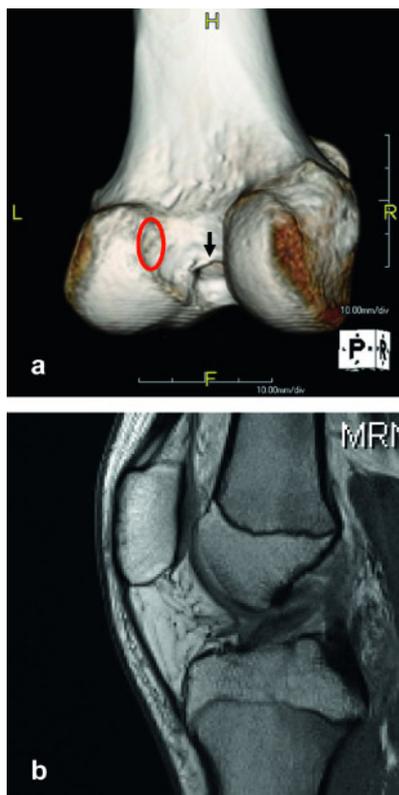


Abbildung 4 a) Dreidimensionale Rekonstruktion einer Computertomographie (CT). Die CT ist eine genaue Methode zur Beurteilung der Tunnelposition und der Tunnelweite. Diese Abbildung zeigt eine völlig falsche Position des femoralen Tunnels im anterioren Anteil hoch in der Fossa intercondylaris (Pfeil). In einem solchen Fall kann femoral bei der Revision einzeitig vorgegangen werden. Der neue Tunnel kann am vorhandenen Tunnel vorbeiplaziert werden (roter Kreis). **b)** MRT einer proximalen VKB-Ruptur.

schwere und vom Abstand zum Unfallereignis lassen sich unterschiedliche Befunde erheben (Ödem, i.a. Erguss). Auch auf die Lokalisation der Ruptur (proximaler Ausriss, Abb. 4b, ossärer tibialer Ausriss, Partialruptur) erlaubt die MRT-Rückschlüsse. Damit ist die MRT für die Diagnostik und gutachterliche Fragen zum Unfallzusammenhang die Methode der Wahl. Nachteil der MRT ist, dass sie keine funktionelle Untersuchung ermöglicht. MRT-Befunde dürfen daher nur in Zusammenhang mit der Anamnese und den klinischen Tests gewertet werden.

Die Computertomographie ist das Verfahren der Wahl zur Darstellung und Beurteilung der Bohrkanäle nach VKB-Ersatzplastik. Dieses Verfahren kommt

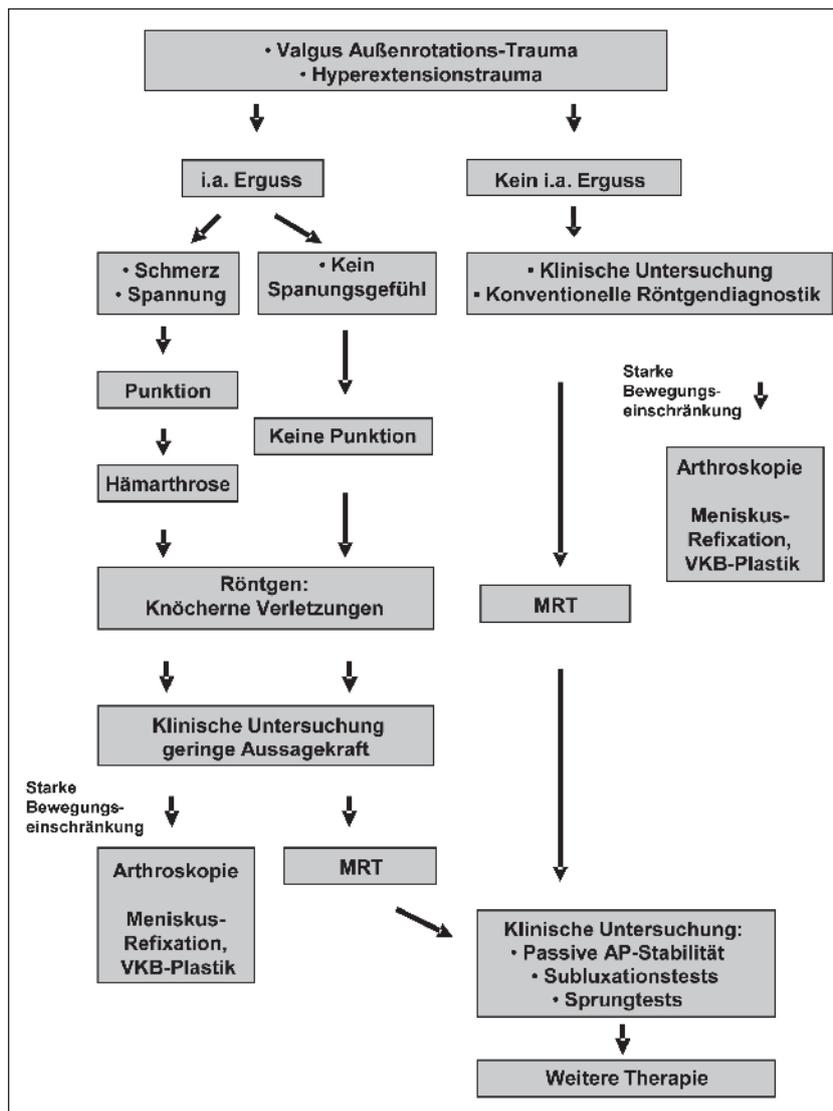


Abbildung 5 Algorithmus zur Diagnostik und Management nach VKB-Ruptur (modifiziert nach Petersen/Zantop, Das vordere Kreuzband, Dt. Ärzteverlag, 2009).

vor allem bei der Planung von Revisionseingriffen zum Einsatz. Dreidimensionale Rekonstruktionen erlauben eine präzise Bestimmung der Bohrkanalposition (Abb. 4a).

Abbildung 5 zeigt einen möglichen Algorithmus für die Diagnostik und das Management nach VKB-Ruptur.

Partialrupturen

Das Vorkommen von Partialrupturen werden kontrovers diskutiert. Isolierte Rupturen des posterolateralen (PL) und des anteromedialen (AM) Bündels werden jedoch von verschiedenen Autoren beschrieben [29, 37]. PL-Rupturen entstehen entsprechend des Spannungsverhaltens extensionsnah; zu isolierten

AM-Rupturen kommt es bei gebeugtem Kniegelenk.

Die Diagnose von Partialrupturen ist schwierig. Hier müssen klinische Befunde, bildgebende Verfahren und der arthroskopische Befund sorgfältig gewichtet werden. Klinisch können isolierte PL-Rupturen durch ein positives Pivot shift Phänomen auffallen. Bei AM-Rupturen fällt das Pivot shift Phänomen oft weniger deutlich aus. AM-Rupturen können jedoch zu einem Streckdefizit führen. Bandreste des VKB können am vorderen Rand der Fossa intercondylaris einklemmen. Im MRT lassen sich bei frischen Läsionen Ödeme oder Kontinuitätsunterbrechungen des entsprechenden Bündels nachweisen. Arthroskopisch deuten nur frische Verletzungszei-

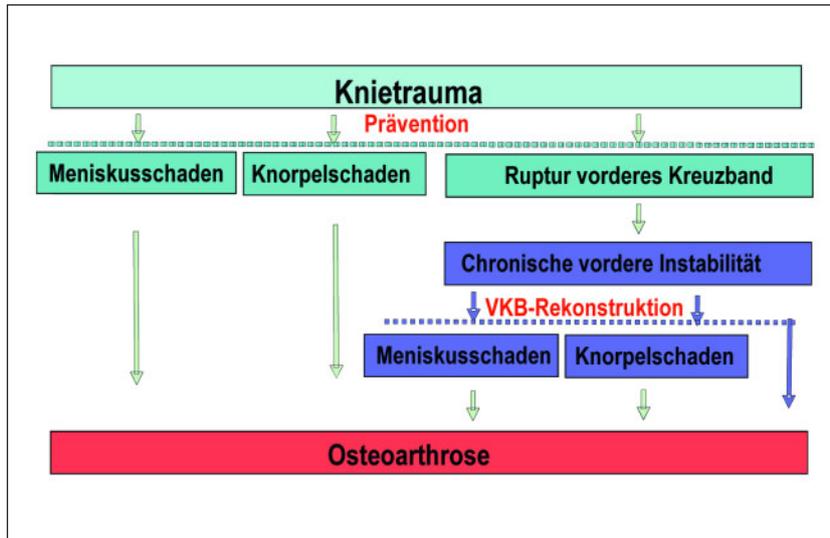


Abbildung 6 Knie Trauma Kaskade (modifiziert nach Petersen/Zantop, Das vordere Kreuzband, Dt. Ärzteverlag, 2009). Die Knie Trauma Kaskade zeigt, dass die posttraumatische Gonarthrose nicht nur auf die Instabilität zurückzuführen ist. Auch initiale Meniskus- und Knorpelschäden können zur Arthroseprogression beitragen. Diese Schäden können durch eine VKB-Ersatzplastik nicht beeinflusst werden. So kann erklärt werden, dass in einigen Fällen degenerative Veränderungen trotz wiederhergestellter Stabilität auftreten.

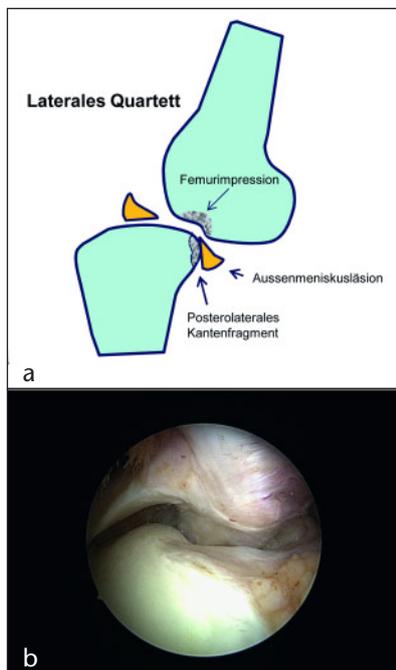


Abbildung 7 a) Schematische Darstellung des Pathomechanismus für das laterale Quartett. Dabei luxiert das laterale Tibiaplateau vor den Femurcondylus. So entstehen die cartilaginären und knöchernen Läsionen an Femur und Tibia (posterolaterales Kantenfragment und anteriore Femurimpression). Das Aussenmeniskushinterhorn wird dadurch nach posterior gezogen. So entstehen Meniskuskülösungen. **b)** Eine besondere Form der Aussenmeniskuskülösion ist die sogenannte Wurzelläsion (Root tear).

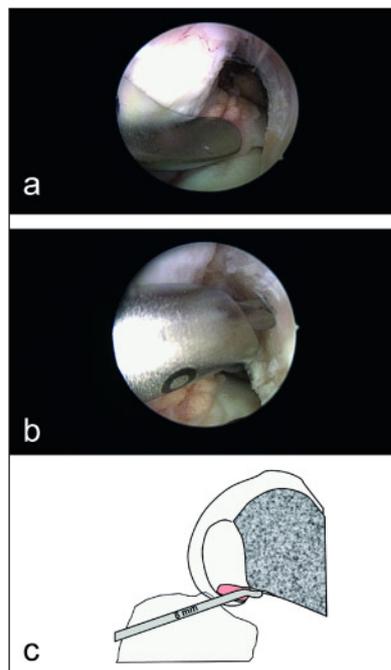


Abbildung 8 Anatomische VKB-Rekonstruktion in Einzelbündel Technik mit einem speziellen Portalzielgerät (MP aimer, Karl Storz, Tuttlingen). a) Einbringen des Zielgerätes über das mediale Portal. b) Der Zielhaken wird hinter die Linea intercondylaris geklemmt. Dabei muss das Knie mehr als 110° gebeugt sein. Über das Zielgerät wird ein Zieldraht eingebracht, der anschließend überbohrt wird. c) Schematische Darstellung des Portalzielgerätes.

chen oder der Kontinuitätsverlust auf eine isolierte PL-Ruptur hin, da dieses Bündel in Beugung entspannt ist.

Beim Vorliegen einer Partialruptur bevorzugen wir den anatomischen Bündelersatz unter Schonung des intakten Bündels.

Osteoarthrose nach VKB-Ruptur

Der Verlust des VKB kann zu einer anterolateralen Rotationsinstabilität führen. Diese Instabilität kann den Patienten direkt beeinträchtigen (Instabilitätssymptome, Giving way) und zur Sportunfähigkeit führen. Langfristig kann eine vordere Instabilität auch zu sekundären Schäden am Gelenk führen [14, 33].

So kommt es bei chronischer vorderer Subluxation zu einer vermehrten Belastung der hinteren Anteile des Tibiaplateaus und der Menisken. Diese Belastung kann langfristig zu Meniskuskülösungen und zur Entstehung einer postero-medialen Gonarthrose führen.

Dieser Zusammenhang wurde von Daniel et al. [5] als „VKB-Kaskade“ (ACL Cascade) bezeichnet. Die VKB-Kaskade beschreibt die Arthroseentstehung nach VKB-Ruptur jedoch unvollständig. Bei diesem Modell zur Arthroseentstehung bleiben initiale Begleitverletzungen (Band-, Meniskus- und Knorpelschäden) unberücksichtigt. Dabei besitzen initiale Meniskus- und Knorpelschäden eine große Bedeutung für das Ergebnis nach VKB-Ersatzplastik. Es ist sinnvoller die „Knie Trauma Kaskade“ zu betrachten (Abb. 6). Initiale Meniskus und Knorpelschäden können als Erklärung für die Beobachtungen klinischer Studien dienen, die radiologische Arthrosezeichen auch bei Patienten nach VKB-Rekonstruktion beschreiben [14]. Mit einer VKB-Ersatzplastik kann nur die symptomatische chronische vordere Instabilität behandelt werden.

Indikation

Eine prospektive Studie konnte zeigen, dass Sekundärschäden und degenerative Gelenkschäden bei Patienten mit symptomatischer Instabilität und Risikofaktoren durch eine Kreuzbandplastik verhindert werden können [13, 31]. Risikofaktoren sind hohe Aktivität, das Auftreten von Giving way Phänomenen im Sport oder Alltag, erhöhte A-P-Translati-

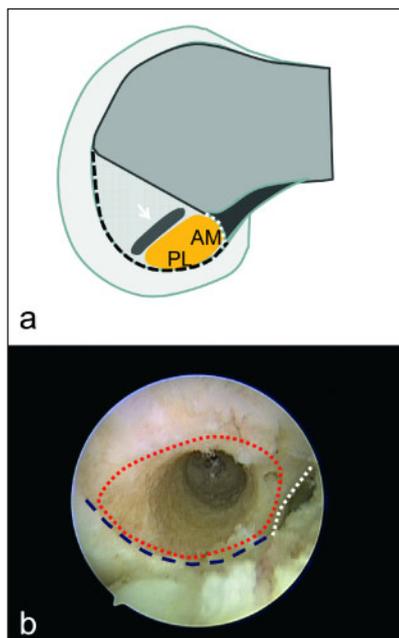


Abbildung 9 a) Schematische Darstellung der femoralen Insertion des vorderen Kreuzbandes. Vor der Insertionszone liegt die sogenannte „Residents ridge“. Diese Erhebung erschwert die Darstellung der femoralen Insertionszone beim Blick über das antero-mediale Standardportal. **b)** Darstellung des femoralen Tunnels in Einzelbündel Technik. Nur der Blick über das mediale Portal erlaubt eine gute Übersicht über die femorale Insertion des VKB (rote Linie: ehemalige VKB Insertion, schwarze gestrichelte Linie: Knorpelknochengrenze, weiße gestrichelte Linie: Linea intercondylaris).

on und ein positives Pivot shift Phänomen.

Ein gewisser Teil der Patienten soll eine Kreuzbandruptur kompensieren können (Coper). Diese Kompensation ist unabhängig vom Aktivitätsgrad. Es konnten verschiedene Kriterien identifiziert werden um Kompensierer zu identifizieren [16]:

1. Ein-Bein-Sprungtest > 80 % der Gegenseite,
2. mehr als ein Giving way Phänomen,
3. Einschränkung der Tätigkeiten des täglichen Lebens < 80 % und
4. einen Kniefunktionscore < 60 %.

Die Indikation zur VKB-Plastik ist daher immer eine individuelle Entscheidung. Patienten und Sportler, die nicht bereit sind ihre Aktivität zu modifizieren und eine symptomatische Instabilität aufweisen, sind Kandidaten für eine operative VKB-Rekon-

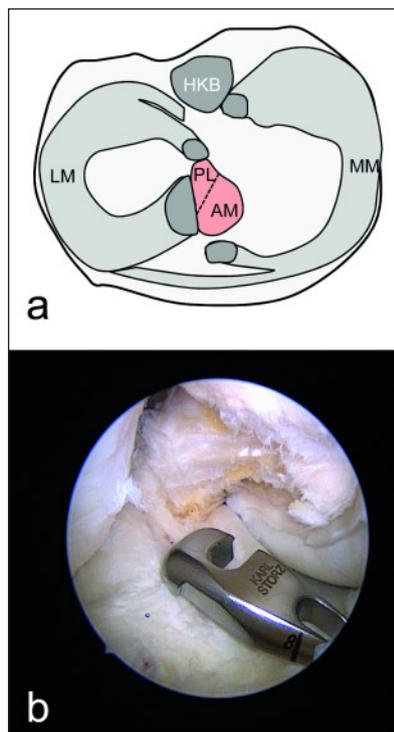


Abbildung 10 a) Schematische Darstellung der tibialen Insertion des vorderen Kreuzbandes. Als Landmarke für das Aufsuchen des Mittelpunktes dient das Aussenmeniskusvorderhorn. **b)** Zielgerät mit Orientierung am Aussenmeniskusvorderhorn.

struktion. Auch das Vorliegen eines rekonstruierbaren Meniskus-Korbhenkelriss spricht für eine VKB-Plastik, da die Rerupturrate bei instabilem Kniegelenk hoch ist. Für eine VKB Plastik sprechen auch Sekundärschäden, die auf eine Instabilität zurückgeführt werden können (Meniskus- und Knorpelschäden).

Ein höheres Lebensalter (> 40 Jahre) ist im Gegensatz zu früheren Darstellungen kein Ausschlusskriterium für eine VKB-Plastik. Auch bei älteren Patienten besteht bei symptomatischer Instabilität die Indikation zur VKB-Plastik. Hier spielt die Arthroseprävention jedoch keine Rolle. Bei gleichzeitiger symptomatischer Osteoarthrose und Varusstellung sollte die Indikation zur hohen tibialen Umstellungsosteotomie überprüft werden. Liegen gleichzeitig Instabilitätssymptome vor, kann der Eingriff

ein- oder zweizeitig mit einer VKB-Plastik kombiniert werden.

Bei Kindern mit offenen Wachstumsfugen ist die Indikation zur VKB-Ersatzplastik weiterhin umstritten. Verlaufsbeobachtungen haben gezeigt, dass bei Kindern mit vorderer Instabilität eine hohe Inzidenz an Sekundärschäden besteht [1]. Bei der Verwendung von reinen Sehnentransplantaten ohne Knochenblock wird das Risiko der Schädigung der Wachstumsfuge als gering eingeschätzt. Eine neuere Studie aus Skandinavien hat jedoch gezeigt, dass auch Kinder Strategien entwickeln können, mit denen die vordere Instabilität kompensiert werden kann (Coper) [15]. Bei der kindlichen vorderen Kreuzbandruptur sollte eine sorgfältige Indikationsprüfung durchgeführt werden.

OP Zeitpunkt

Kontrovers wird das Management nach akuter VKB-Ruptur diskutiert. Lange Zeit galt die Devise, dass VKB-Rupturen aufgrund des Arthrofibrosierisikos erst nach sechs Wochen operativ versorgt werden dürfen. Verschiedene Autoren hatten über eine Korrelation zwischen OP Zeitpunkt und Arthrofibrose berichtet. So soll die Arthrofibroserate bei Durchführung einer VKB-Ersatzplastik in den ersten vier Wochen nach dem Trauma erhöht sein. Aus diesem Grunde wurde zunächst eine Arthroskopie zur Resektion von Bandresten durchgeführt und dann das VKB nach einem Intervall von sechs Wochen rekonstruiert.

Dieses Vorgehen haben wir heute weitgehend verlassen. Mayr et al. [14] haben 372 Patienten, die aufgrund einer Arthrofibrose nach VKB-Ersatzplastik reoperiert werden mussten, nachuntersucht. In dieser Studie bestand ein signifikanter Zusammenhang einer präoperativen Reizung des Kniegelenkes und einer postoperativen Arthrofibrose. Als weiterer wichtiger Riskofaktor konnte die präoperative Bewegungseinschränkung identifiziert werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse darf der OP-Zeitpunkt heute nicht isoliert als Riskofaktor gesehen werden. Wichtiger ist der Zustand des Kniegelenkes. Bei reizlosem Knie mit freier Beweglichkeit die Gefahr einer Arthrofibrose auch bei Frühversorgung gering.

Aus diesem Grunde wird von manchen Autoren auch eine präoperative

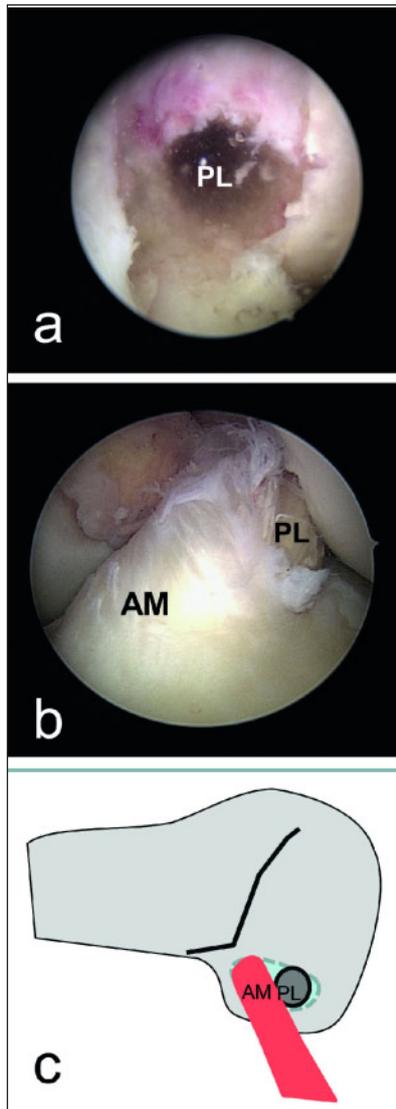


Abbildung 11 Partielle Ersatz des posterolateralen Bündels bei einer Partialruptur des vorderen Kreuzbandes.. **a)** Bei gebeugtem Knie liegt der femorale PL Tunnel vor der Insertion des AM Bündels, dass in diesem Fall intakt ist. **b)** Diese Abbildung zeigt ein intaktes AM Bündel und ein Gracilissehnen-Transplantat, das als PL Ersatz eingezogen wurde. **c)** Schematische Darstellung des femoralen Tunnels vor der AM Insertion femoral.

Physiotherapie empfohlen, um das Knie für die Kreuzbandrekonstruktion zu konditionieren. Begleitend sollten entzündungslimitierende Maßnahmen zum Einsatz kommen (Kühlung, NSAR, Lymphdrainage).

Begleitverletzungen

Isolierte Rupturen des vorderen Kreuzbandes sind sehr selten. Oft werden be-

gleitende Meniskus- und Knorpelverletzungen beobachtet. Auch begleitende ligamentäre Instabilitäten sind häufig. Das sogenannte „unhappy triad“, die Kombination von VKB-Ruptur, Ruptur des medialen Kollateralbandes und des medialen Meniskus tritt eher selten auf. In der klinischen Praxis sehen wir die Ruptur des vorderen Kreuzbandes häufiger in Kombination mit Affektionen des Außenmeniskus, Femurimpression und posterolaterales Kantenfragment (Abb. 7). Dieses Verletzungsmuster bezeichnen wir als „laterales Quartett“. In ca. 10–15% der Fälle kommt es zu Verletzungen des Aussenmeniskushinterhornes (Root tear) (Abb. 7). Weiterhin kommen partielle und komplette Läsionen des lateralen Kapselbandapparates vor. All diese Verletzungen sind auf den Unfallmechanismus zurückzuführen, bei dem das Tibiaplateau vor den lateralen Femurcondylus subluxiert (Abb.8).

Für das akute Mangement sind jedoch nur eingeklemmte Meniskuskorbenkelrupturen oder hochgradige periphere Instabilitäten von Bedeutung, da diese Verletzungen refixiert werden sollten.

Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes

Die Kreuzbandersatzplastik mit einem autologen Sehnen-Transplantat ist heute die operative Therapie der Wahl.

Transplantatwahl

Die am häufigsten verwendeten Sehnen-Transplantate sind die Semitendinosussehne und die Patellarsehne. Aber auch die Quadrizepssehne hat sich klinisch bewährt. Viele Studien haben die Semitendinosussehne und die Patellarsehne miteinander verglichen [10]. Die Unterschiede hinsichtlich der langfristigen Stabilität waren gering. Die Entnahmemorbidität soll nach Verwendung von Patellarsehnen-Transplantaten jedoch erhöht sein. Daher sollten Patellarsehnen-Transplantate bei Patienten mit knien den Tätigkeiten nicht verwendet werden. Auch bei muslimischen Patienten muss auf jeden Fall auf dieses Problem hingewiesen werden. Auch bei Frauen mit geringer Körpergröße (geringer Durchmesser der Patellarsehne ist Vorsicht geboten. Indikationen zur Verwen-

dung von Knochenblocktransplantaten sehen wir aber bei jungen Leistungssportlern unter 20 Jahren, da hier ein sehr hohes Rerupturrisiko aufgrund verminderter Compliance besteht. Durch die Verwendung von Knochenblöcken sind Revisionen dann einfacher. Außerdem werden die Patienten durch die Entnahmemorbidität im Rahmen der postoperativen Rehabilitation mehr gebremst. Zu Bedenken ist jedoch, dass die Inzidenz arthrotischer Veränderungen nach Patellarsehnen-Transplantat höher sein soll als nach der Verwendung von Semitendinosussehnen-Transplantaten.

Bei Transplantaten aus dem Streckapparat ist auch eine knochenblockfreie Entnahme möglich. In diesen Fällen ist die Entnahmemorbidität geringer.

Als Kontraindikation zur Verwendung von Semitendinosussehnen-Transplantaten der ipsilateralen Seite sind chronische mediale Instabilitäten beim Valgusknie zu sehen. Durch den zusätzlichen Verlust der aktiven Stabilisatoren kann es zu einem medialen Kollaps kommen.

Zur Quadrizepssehne liegen bisher nur wenig klinische Daten vor. Die Entnahmemorbidität soll jedoch deutlich geringer sein als bei der Patellarsehne. Auch allogene Transplantate von Organ Spendern kommen als Kreuzband-Transplantat in Frage. Sie sind in Deutschland jedoch nur schwer erhältlich.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Indikationen und relativen Kontraindikationen der verschiedenen Transplantate. Es gibt sicher eine große Schnittmenge an Patienten, bei denen alle drei Transplantate alternative verwendet werden können. Trotzdem sehen wir es als eine Herausforderung für die Zukunft an, patientenspezifische Transplantatindikationen besonders im Hinblick auf die sportliche Aktivität im Sinne eines „À la carte-Konzeptes“ weiterzuentwickeln.

Anatomisches Rekonstruktionskonzept

Erfahrungen aus der Revisionschirurgie haben gezeigt, dass der häufigste Grund für einen Misserfolg nach VKB-Rekonstruktion eine unkorrekte Lage der Knochentunnel zur Verankerung der Transplantate ist. Die Funktion des vorderen Kreuzbandes kann nur wieder hergestellt werden wenn die Knochentunnel innerhalb der femoralen und tibia-

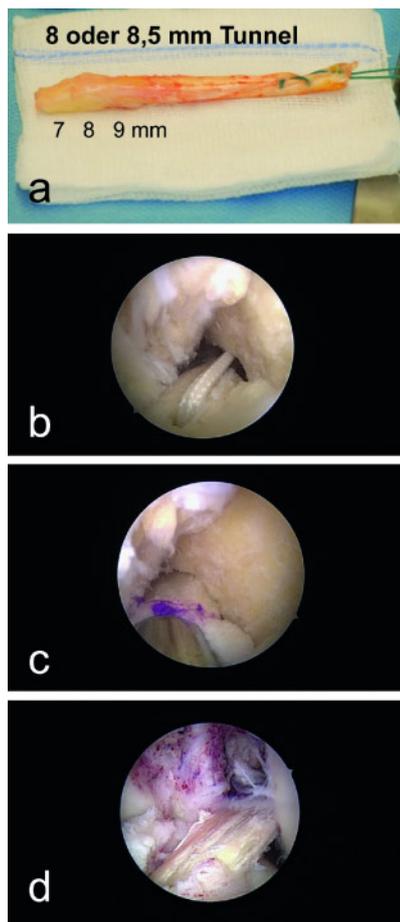


Abbildung 12 Femorale Pressfit Fixation eines autologen Quadrizepssehnentransplantates. **a)** Präparation des Transplantates, **b)** Einzug des Knochenblockes über das mediale Portal, **c)** Einstößeln des Knochenblockes, **d)** Pressfit fixiertes Transplantat.

len Insertion des VKB platziert werden. Dieses Konzept wird als **anatomische VKB-Rekonstruktion** bezeichnet [21] (Abb. 8). Anatomische Kreuzbandrekonstruktionen können in Einzel- und Doppelbündeltechnik unter Verwendung aller Transplantate durchgeführt werden (Abb. 9).

Die femorale Insertion am lateralen Femurcondylus ist vom klassischen anterolateralen Arthroskopieportal nur sehr schwierig vollständig darstellbar. Eine gute Übersicht gelingt oft erst wenn das Arthroskop im anteromedialen Portal platziert wird („Portalblick“, Abb.9).

Portalbohren

Die Bohrtechnik kann einen großen Einfluss auf die Tunnelposition haben. Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass

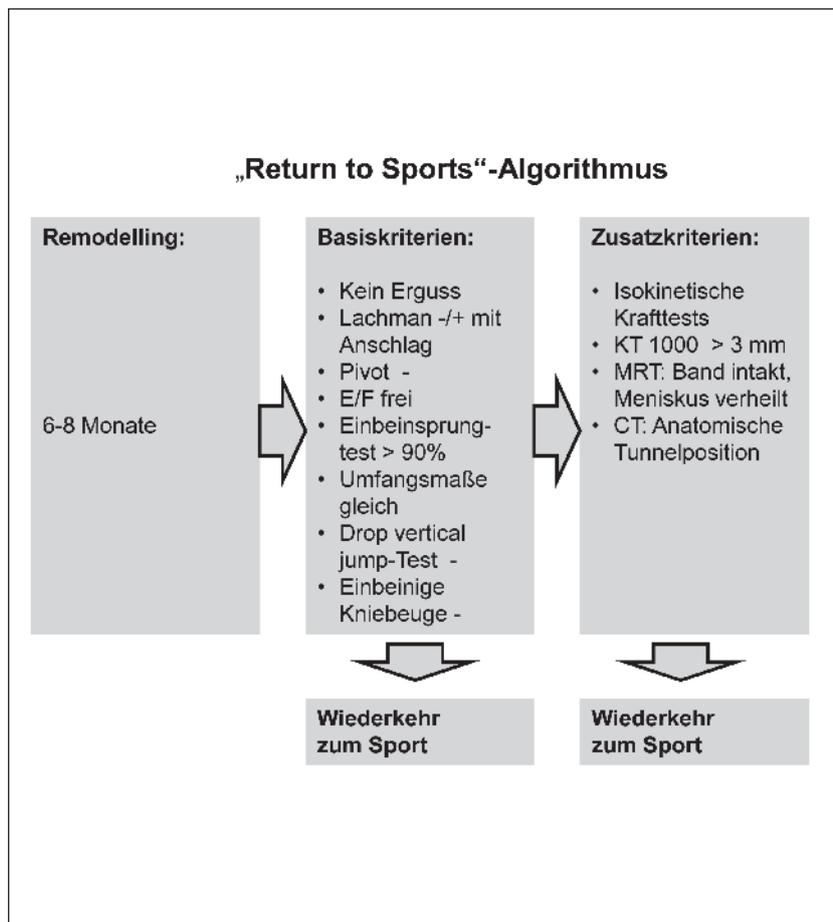


Abbildung 13 „Return to sports“ Algorithmus.

bei transtibialer Bohrtechnik die Tendenz besteht, den femoralen Tunnel zu steil anzulegen, wenn der Eintritt des tibialen Kanals nicht sehr weit medial gewählt wird. Das Bohren des femoralen Tunnels über das mediale Portal bietet den Vorteil, den Eintritt des Bohrers freier wählen zu können als bei der transtibialen Bohrtechnik [2, 21]. Der femorale Kanal kann auf diese Weise unabhängig vom tibialen Kanal angelegt werden. So wird auch das Risiko primärer Tunnelweitungen minimiert.

Tibialer Tunnel

Vielen Operateuren diene der vordere Rand des hinteren Kreuzbandes zur Orientierung bei Anlage des tibialen Tunnels. Bei dieser Technik liegt der tibiale Tunnel jedoch zu weit hinten. Es resul-

tiert ein steiles Transplantat. Viele Operateure waren der Ansicht, dass durch die hintere tibiale Tunnellage ein „pathologisches Impingement“ des Transplantates am Dach der Fossa intercondylaris vermieden wurde.

Eine zuverlässigere Landmarke ist das Außenmeniskusvorderhorn (Abb. 10b). Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass postoperative Streckdefizite bei anatomischer Platzierung des tibialen Kanals nicht vorkommen. Das liegt daran, dass auch das normale Kreuzband in Streckung in Kontakt zur Fossa intercondylaris tritt. Das wird als „physiologisches Impingement“ bezeichnet [21].

Einzelbündel vs. Doppelbündel

Kontrovers wird derzeit diskutiert, ob das VKB in Einzel- oder Doppelbündel-

Transplantat	Indikation	Relative Kontraindikation
Semi/Gracilis	– Doppelbündel-Technik	– Mediale Instabilitäten (ipsilateral)
	– Große Insertionszonen	– Genu valgum mit Torsionsfehler (ipsilateral)
	– Partialersatz des AM oder PL Bündels	– Alter 16–20 (kein Doppelbündel wegen Rerupturrisiko)
	– Patienten mit knienden Tätigkeiten	
	– Patienten mit femoropatellaren Problemen	
	– Offene Wachstumsfugen	
	– Ältere Patienten über 40	
Patellarsehne	– Revisionen (Knochenblock)	– Knieende Tätigkeit
	– Patienten mit hohem Reruptur-Risiko	– Offene Wachstumsfugen (mit Knochenblock)
	– Alter < 20	– Femoropatellare Schmerzen
	– Risikosportarten: Basketball, Fußball,	– Kleine Frauen
Quadrizepssehne	– Revisionen (Knochenblock)	– Femoropatellare Schmerzen (mit (Knochenblock)
	– Patienten mit hohem Rerupturrisiko	– Kleine Frauen
	– Alter < 20	– Offene Wachstumsfugen (Knochenblock)
	– Risikosportarten: Basketball, Fußball,	

Tabelle 1 Indikation und Kontraindikation zu verschiedenen Techniken der VK-Rekonstruktion

technik rekonstruiert werden soll. Biomechanische und klinische Studien haben zeigen können, dass objektive Parameter (KT 1000, Pivot shift) mit der Doppelbündeltechnik besser wiederhergestellt werden können als mit einer Einzelbündeltechnik [16, 19, 34, 35, 36]. Klinische Scores konnten jedoch bisher keinen Unterschied zeigen. Langzeiterfahrungen mit der Doppelbündeltechnik liegen bisher nicht vor. Diese Technik ist zudem technisch anspruchsvoll, zeitintensiver und teurer. Daher gilt die anatomische Einzelbündelrekonstruktion weiterhin als Standardmethode.

Derzeit sehen wir als Indikation für eine Doppelbündelrekonstruktion Patienten mit großen Insertionszonen (Körpergröße ab 175 cm, siehe auch Tab.1).

Fixation

Den Fixationstechniken des VKB-Transplantates wurde lange Zeit eine zu hohe Bedeutung beigemessen. Vorteil von Pa-

tellarsehnentransplantaten ist die Möglichkeit zur implantatfreien Fixation (Press fit). Dabei werden die Knochenblöcke im Tunnel verklemmt (Abb. 12). Patellarsehnentransplantate können jedoch auch mit Stiften, Interferenzschrauben oder extrakortikal fixiert werden. Die Fixation von Beugesehnentransplantaten (Sehne des M. semitendinosus) wurde lange Zeit kontrovers diskutiert. Als Nachteil indirekter gelenkferne Fixationsverfahren wurde deren geringe Steifigkeit [12] gesehen. Postoperative Tunnelweitungen wurden auf einen sogenannten „Bungeecord Effekt“ geschoben. Mittlerweile besteht jedoch Übereinstimmung dass die Tunnelweitung ein multifaktorielles Geschehen ist. Gelenknahe Fixationsmethoden haben unter biomechanischen Gesichtspunkten zum Zeitpunkt der OP (primäre Stabilität) Vorteile im Vergleich zu gelenkfernen Methoden. In klinischen Studien konnten sich diese Vorteile für die reine Interferenzschraubenfixation jedoch nicht bestätigen [32]. Tierexperi-

mente haben Hinweise ergeben, dass die Kompression des Transplantates durch eine überdimensionierte Schraube im Knochentunnel das Remodeling und das Einheilen negativ beeinflussen kann [40]. Unter biologischen Gesichtspunkten könnte die Verwendung passgerechter oder unterdimensionierter Schrauben sinnvoll sein. Die schlechtere Primärstabilität unterdimensionierter Schrauben muss dann jedoch durch eine zusätzliche extrakortikale Fixation ausgeglichen werden (Hybrid Fixation).

Partialersatz und „Remnant augmentation“

Aufgrund der Beobachtung, dass auch isolierte Rupturen der einzelnen Bündel vorkommen, wurden Techniken entwickelt, diese auch separat zu rekonstruieren. Vorteile dieser Techniken sollen der Erhalt propriozeptiver Elemente sein. Außerdem reicht als Ersatz eines einzelnen Bündels oft die dünnere Gracilissehne. Die bisherigen klinischen Er-

fahrungen mit dem isolierten AM- oder PL-Ersatz sind positiv [29, 37]. Die OP Technik ist aber komplizierter, da die Übersicht durch die erhaltenen Bandfasern eingeschränkt ist.

Die „Remnant augmentation“ beruht auf dem Konzept, alte Bandfasern möglichst zu erhalten und das Sehnen-transplantat in das alte Band hinein-zuziehen. Vorteil soll auch hier der Erhalt der Proprizeptoren sein. Unsere bisherigen Erfahrungen mit diesem Konzept sind positiv.

Rehabilitation nach VKB-Ersatzplastik

Die Rehabilitation nach VKB-Ersatzplastik ist aufwendig. Das sollte dem Patienten bei der präoperativen Aufklärung bereits vermittelt werden.

Postoperativ kommt es zu Veränderungen im Transplantat, die die mechanische Stabilität deutlich herabsetzen (Nekrose – Revaskularisation – ligamentärer Umbau) [38]. Diese Umbauvorgänge können bis zu einem Jahr andauern. Aus diesem Grunde muss das VKB-Transplantat in der ersten Zeit nach der VKB-Ersatzplastik geschützt werden.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Nachbehandlungsprotokolle, die sich zum Teil deutlich voneinander unterscheiden [2]. Kontrovers werden im Schrifttum die postoperative Belastung und die Verwendung von Orthesen diskutiert. Bisher gibt es keine Hinweise, dass eine postoperative Teilbelastung oder die Verwendung von Orthesen zu besseren Ergebnissen nach vorderer Kreuzbandplastik führen [2]. Erwiesen ist bisher nur die Effektivität von Übungen in geschlossener Kette im Vergleich zu Übungen in offener Kette [2].

Wichtig ist es unserer Ansicht nach, die Nachbehandlung individuell dem Patienten, dem Transplantat, den Begleitverletzungen und dem OP-Ergebnis anzupassen. So kann die gleichzeitige Therapie von Knorpel- und Meniskusverletzungen den Gebrauch beugelimittierender Orthesen oder eine längere Teilbelastung erforderlich machen. Ein Vorgehen nach „Kochrezept“ sollte vermieden werden. Die Rehabilitationsphase nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes kann in drei verschiedene Phasen unterteilt werden:

Ziel der **Frühphase** (1.–14. Tag postop.) ist ein reizloses Kniegelenk. Um dieses Ziel zu erreichen setzen wir physikalische Maßnahmen (Kühlung, Hochlagerung, isometrisches Quadrizepstraining, Lymphdrainage) ein. Auf NSAR verzichten wir, da diese Medikamente die Sehnen-Knochen-Heilung hemmen können. Zur Schonung soll der Patient in dieser Zeit mit 20 kg Teilkörpergewicht belasten. Das Knie wird mit einer geraden Orthese geschützt.

Nach der zweiten Woche kann die Belastungsintensität langsam gesteigert werden (**mittlere Phase**). Die Orthese wird bis zum Ablauf der 6. postoperativen Woche getragen. In dieser Zeit soll die Beweglichkeit gesteigert werden und mit Übungen in geschlossener Kette begonnen werden. Bei persistierenden Streckdefiziten sollte frühzeitig die Indikation zur Rearthroskopie gestellt werden. Ursache kann eine Zyklopläsion sein.

Die **Spätphase** der Rehabilitation dient der Steigerung der Kraft und Beweglichkeit und der Verbesserung der Propriozeption sowie neuromuskulärer Funktionen.

„Return to Sport“

Das Thema Wiederkehr zum Sport wird derzeit kontrovers diskutiert [3]. Wenig umstritten ist, dass das Transplantat während der Zeit seines Umbaus (Remodelling) vor einer zu hohen Beanspruchung geschützt werden muss. Tierexperimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass der Umbau des Transplantates bis zu einem Jahr dauert [39]. In einer kürzlich durchgeführten Umfrage der Instrukto-ren der deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Arthroskopie gab die Mehrzahl der Instrukto-ren an, dass sie eine Wiederkehr zum Sport nach bereits sechs Monaten als zu früh erachten. Die Mehrzahl der Befragten sah den optimalen Zeitpunkt zwischen acht und zwölf Monaten postoperativ. Aber nicht nur aufgrund des Transplantatumbaus sollte der Zeitpunkt zur Wiederkehr zum Sport sorgfältig gewählt werden. Auch die neuromuskulären und propriozeptiven Fähigkeiten sollten möglichst wieder hergestellt sein. Ein Problem im Rahmen der postoperativen Rehabilitation ist auch die Beseitigung von Bewegungsmustern, die zu einer VKB-Ruptur führen können (valgische innenrotierte Kniestellung,

Landung nach Sprung mit wenig gebeugter Hüfte). All diese funktionellen Faktoren sollten mit einer Testbatterie sogenannten „Wiederkehr zum Sportkriterien“ überprüft werden. Als Basistests können klinische Tests zum Zustand des Kniegelenkes dienen: Kein intraartikulärer Erguss, Lachman-Test, Pivot shift-Phänomen, Beweglichkeit. So sind das Fehlen eines Ergusses, eine weitgehend freie Beweglichkeit und eine passive Stabilität Grundvoraussetzungen zur Rückkehr zum Sport. Umfangmaße des Oberschenkels geben Hinweise auf den muskulären Rehabilitationsstand. Einbeinsprungtests (> 90 % der Gegenseite) geben Hinweise auf die funktionelle Stabilität der unteren Extremität. Mit dem „Drop vertical jump“-Test und einbeinigen Kniebeugen können gefährdende Bewegungsmuster erfasst werden. Diese Basistests können direkt in der Sprechstunde durchgeführt werden und erlauben in den meisten Fällen eine Entscheidung. Diese Basisdiagnostik kann durch instrumentelle und apparative Untersuchungen ergänzt werden: KT 1000-Messung (objektive a-p-Stabilität), isokinetische Kraftmessungen.

Bildgebende Verfahren halten wir erst bei pathologischen Tests im Hinblick auf die Beweglichkeit oder die Stabilität des Gelenkes für indiziert. Sie sollen Aufschluss über die Intaktheit des Transplantates, die Tunnelposition und die Heilung von Begleitverletzungen geben. Bei pathologischen Befunden hinsichtlich der funktionellen Stabilität sollte die Rehapphase verlängert werden. Bei Einschränkungen der Beweglichkeit und anatomischer Tunnelage sollte nach sechs bis acht Monaten an eine Rearthroskopie mit Cyclopsresektion gedacht werden. Bei Instabilitätsproblemen oder nicht-anatomischer Tunnelage muss evtl. an eine frühzeitige Revisionsoperation gedacht werden. Abbildung 14 zeigt einen Überblick über die Kriterien, die die Entscheidung, ob ein Athlet zum Sport zurückkehren kann, unterstützen können. OUP

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Wolf Petersen
Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
Martin Luther Krankenhaus
Caspar-Theyß-Straße 27–31
14193 Berlin
E-Mail: w.petersen@mlk-berlin.de

Literatur

1. Aichroth PM, Patel DV, Zorrilla P. The natural history and treatment of rupture of the anterior cruciate ligament in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Br* 2002; 84: 38–41
2. Andersson D, Samuelsson K, Karlsson J. Treatment of anterior cruciate ligament injuries with special reference to surgical technique and rehabilitation: an assessment of randomized controlled trials. *Arthroscopy* 2009; 25: 653–85
3. Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 2011; 27: 1697–705
4. Caraffa A, Cerulli G, Progetti M, Aisa G, Rizzo A: Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer: A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1996; 4: 19–21
5. Daniel DM, Stone ML, Dobson BE, Fithian DC, Rossman DJ, Kaufman KR. Fate of the ACL-injured patient: a prospective outcome study. *Am J Sports Med*. 1994; 22: 632–644
6. Fitzgerald GK, Axe MJ, Snyder-Mackler L, Fitzgerald A decision-making scheme for returning patients to high-level activity with nonoperative treatment after anterior cruciate ligament rupture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2000; 8: 76–82
7. Griffin LY: The Henning program. In: Griffin LY (ed.) *Prevention of noncontact ACL injuries*, American Academy of Orthopaedic Surgeons, Rosemont, USA, 2000
8. Ettlinger CF, Johnson RJ, Shealy JE. A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing. *Am J Sports Med* 1995; 23: 531–7
9. Garrick JG, Requa RK: Anterior cruciate ligament injuries in men and women: How common are they? In: Griffin LY (ed.) *Prevention of noncontact ACL injuries*, American Academy of Orthopaedic Surgeons, Rosemont, USA, 2000
10. Goldblatt JP, Fitzsimmons SE, Balk E, Richmond JC. Reconstruction of the anterior cruciate ligament: meta-analysis of patellar tendon versus hamstring tendon autograft. *Arthroscopy* 2005; 21: 791–803
11. 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* 1999; 27: 699–706
12. Höher J, Livesay GA, Ma CB, Withrow JD, Fu FH, Woo SL. Hamstring graft motion in the femoral bone tunnel when using titanium button/polyester tape fixation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1999; 7: 215–219
13. Jomha NM, Borton DC, Clingeffer AJ, Pinczewski LA. Long-term osteoarthritic changes in anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Clin Orthop Relat Res* 1999; 358: 188–193
14. Mayr HO, Weig TG, Plitz W. Arthrofibrosis following ACL reconstruction: reasons and outcomes. *Arch Orthop Trauma Surg* 2004; 124: 518–522
15. Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Performance-based functional outcome for children 12 years or younger following anterior cruciate ligament injury: a two to nine-year follow-up study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008; 16: 214–223
16. Muneta T, Koga H, Mochizuki T, Ju YJ, Hara K, Nimura A, Yagishita K, Sekiya I. A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques. *Arthroscopy* 2007; 23: 618–628
17. 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* 1997; 8: 149–153
18. Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, Skjølberg A, Olsen OE, Bahr R: Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: a prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med* 2003; 13: 71–78
19. Järvelä T, Moisala AS, Sihvonen R, Järvelä S, Kannus P, Järvinen M. Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Hamstring Autografts and Bioabsorbable Interference Screw Fixation: Prospective, Randomized Clinical Study with Two-Year Results. *Am J Sports Med* 2008; 36: 290–297
20. Petersen W, Tillmann B. Structure and vascularization of the cruciate ligaments of the human knee joint. *Anat Embryol (Berl)* 1999; 200: 325–334
21. Petersen W, Zantop T. Anatomische VKB Rekonstruktion. *Arthroscopie* 2007: 132–138
22. Petersen W, Tillmann B. Anatomy and function of the anterior cruciate ligament. *Orthopaede* 2003; 31: 710–718
23. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res* 2007; 454: 35–47
24. Petersen W, Zantop T. Technik der Anatomischen Doppelbündel Rekonstruktion. *Arthroscopie* 2, 2007: 132–138
25. Petersen W, Tretow H, Weimann A, Herbolt M, Fu FH, Raschke M, Zantop T. Biomechanical evaluation of two techniques for double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: one tibial tunnel versus two tibial tunnels. *Am J Sports Med* 2007; 35: 228–234
26. Petersen W, Rosenbaum D, Raschke M (2005) Rupturen des vorderen Kreuzbandes bei weiblichen Athleten. Teil 1: Epidemiologie, Verletzungsmechanismen und Ursachen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 56: 151–156
27. Petersen W, Zantop T, Rosenbaum D, Raschke M (2005) Rupturen des vorderen Kreuzbandes bei weiblichen Athleten. Teil 2: Präventionsstrategien und Präventionsprogramme. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 56: 157–156–164
28. Petersen W, Braun C, Bock W, Schmidt K, Weimann A, Drescher W, Eiling E, Stange R, Fuchs T, Hedderich J, Zantop T. A controlled prospective case control study of a prevention training program in female team handball players: the German experience. *Arch Orthop Trauma Surg* 2005; 125: 614–621
29. Petersen W, Zantop T. Partial rupture of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy*. 2006; 22: 1143–1145
30. Petersen W. Diagnostik. In: *Das vordere Kreuzband*, Dt. Aertzerverlag, 2009
31. Petersen W. Indikation. In: *Das vordere Kreuzband*, Dt. Aertzerverlag, 2009
32. Prodromos CC, Joyce BT, Shi K, Keller BL. A meta-analysis of stability after anterior cruciate ligament reconstruction as a function of hamstring versus patellar tendon graft and fixation type. *Arthroscopy* 2005; 21: 1202
33. Roos H, Adalberth T, Dahlberg L, Lohmander LS. Osteoarthritis of the knee after injury to the anterior cruciate ligament or meniscus: the influence of time and age. *Osteoarthritis Cartilage* 1995; 3: 261–267
34. Yagi M, Wong EK, Kanamori A, Debski RE, Fu FH, Woo SL. Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2002; 30: 660–666
35. Yagi M, Kuroda R, Nagamune K, Yoshiya S, Kurosaka M. Double-bundle ACL reconstruction can improve rotational stability. *Clin Orthop Relat Res* 2007; 454: 100–107
36. Yasuda K, Kondo E, Ichiyama H, Tanabe Y, Tohyama H. Clinical evaluation of anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction procedure using hamstring tendon grafts: comparisons among 3 different procedures. *Arthroscopy* 2006; 22: 240–251
37. Siebold R, Fu FH. Assessment and augmentation of symptomatic anteromedial or posterolateral bundle tears of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2008; 24: 1289–1298
38. Weiler A, Peine R, Pashmineh-Azar A, Abel C, Südkamp NP, Hoffmann RE. Tendon healing in a bone tunnel. Part

I: Biomechanical results after biodegradable interference fit fixation in a model of anterior cruciate ligament reconstruction in sheep. *Arthroscopy* 2002; 18: 113–123

39. Zantop T, Herbort M, Raschke MJ, Fu FH, Petersen W. The role of the antero-

medial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament in anterior tibial translation and internal rotation. *Am J Sports Med.* 2007; 35: 223–227

40. Zantop T, Weimann A, Wolle K, Musahl V, Langer M, Petersen W. Initial and 6

weeks postoperative structural properties of soft tissue anterior cruciate ligament reconstructions with cross-pin or interference screw fixation: an in vivo study in sheep. *Arthroscopy* 2007; 23: 14–20