

Vordere Kreuzband-OP-Technik: «State of the Art» und Zukunft

Sandro Kohl

University of Bern, Inselspital Bern

Zusammenfassung

Die Behandlung der vorderen Kreuzbandverletzung stellt die Chirurgie seit vielen Jahren vor grosse Herausforderungen. Die Geschichte der Kreuzbandchirurgie ist im Wesentlichen geprägt von der Suche nach dem perfekten Transplantat und dem operativen Fortschritt. In diesem Übersichtssartikel werden die aktuellen chirurgischen Strategien erörtert und ein Blick in die Zukunft gewagt.

Summary

Treatment of anterior cruciate ligament injuries has been a surgical challenge for many years. History of cruciate ligament surgery is based on the search for the ideal graft and operative technique. This review article highlights the current utilized surgical strategies with a glance at the promising future.

Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie 61 (2), 25–30, 2013

Geschichte der Kreuzbandchirurgie

Erste Berichte datieren bereits auf M. Robson 1895, der mittels Catgut Kreuzbänder primär nähte [1]. Die ersten Transplantate wurden von Grekow 1914 und Hey-Groves 1917 benutzt, welche über die Verwendung von Fascia-lata-Streifens [2] und Tractus iliobialis [3] berichteten. Auch die frühe Verwendung der Hamstringsehnen ist dokumentiert und wurde 1926 von Edwards eingesetzt. 1932 benutzte Zur Verth dann auch die gestielte Patellarsehne als Transplantat [4, 5]. Den Grundstein der modernen Kreuzbandchirurgie setzte Brückner 1966. Mit Verwendung eines freien Patellarsehnentransplantates aus dem medialen Drittel kristallisierte sich der teilweise noch heute bestehende Goldstandard heraus [6]. Ab Mitte der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts kam man wegen schlechter Langzeitergebnisse von der Primärnaht ab [7]. Auch wurde dieses nicht mehr als Therapieoption angesehen. Ein zwischenzeitliches Hoch erlebte die Kreuzbandchirurgie Anfang der achtziger Jahre mit der Einführung synthetischer Bandmaterialien (Goretex, Dacron, Trevira, Kohlefaser), welche auch von der Industrie propagiert wurden. Kunstbänder wie das Leeds-Keio-Band oder das Kennedy-LAD zeigten zwar anfänglich gute Resultate. Mittelfristig fanden sich aber extrem hohe Versagerquoten von bis zu 80 % [8]. Die Verwendung allogener Transplantate, die ebenfalls Anfang der achtziger Jahre begann, wurde initial zunächst schnell wieder verworfen. Obwohl die Ergebnisse sehr vielversprechend waren, zeigte die damals zunehmende Ausbreitung von Virusinfektionen (HIV, Hepatitis C) seine Wirkung. Heute ist dank verbesserter Infektionsdiagnostik der Einsatz von Allografts eine Therapieoption. Vor allem in den Vereinigten Staaten wird diese Variante sehr häufig für Primärre-

konstruktionen verwendet. Im europäischen Raum steigt in letzter Zeit deren Bedeutung für Revisionsoperationen [9]. Ein weiterer Meilenstein ist die Verwendung der Arthroskopie. 1982 berichtete Dandy von der ersten arthroskopisch assistierten Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands [10]. Seitdem hat sich die Arthroskopie gegenüber der offenen Arthrotomie immer mehr durchgesetzt und ist heute dank moderner Technik als Standardmethode für den vorderen Kreuzbandersatz etabliert.

Das Transplantat

Der autologe Kreuzbandersatz gilt derzeit als «State of the art». Als Transplantate werden im Wesentlichen die Patellarsehne mit Knochenblöcken (BTB) und die sogenannten Hamstringsehnen (Semitendinosus/Gracilis) (STG) sowie aber auch die Quadricepssehne verwendet. Insbesondere die Diskussion über Patellar- versus Hamstringsehnen hat die Literatur der letzten Jahre stark geprägt. In zahlreichen Vergleichsstudien und Metaanalysen wurden Vor- und Nachteile kontrovers diskutiert, ohne dass sich die Autoren auf eine der Operationstechniken definitiv festlegen konnten. Signifikante Unterschiede in den Resultaten zwischen den STG, BTB und der Quadricepssehne finden sich nicht [11, 12, 13, 14].

Patellarsehne BTB

Dieses Transplantat aus dem mittleren Teil des Ligamentum Patellae mit einem Knochenblock aus der Patellaspitze und aus der Tuberositas tibiae ist das bis in jüngster Zeit am meis-

ten verwendete und untersuchte. Argumente für die Verwendung des BTB sind vor allem die zwei Knochenblöcke, welche zuverlässiger und schneller als ein reines Sehnen-Transplantat einheilen [15]. Nachteile ergeben sich aus den häufig auftretenden femoropatellaren Schmerzen. Dies ist vor allem problematisch bei Patienten mit knienden Berufen. [16, 17, 18]. Des Weiteren ist über eine mögliche Funktionsstörung des Streckapparats mit Quadricepsatrophie und Kraftminderung öfters berichtet [19]. Selten besteht auch das Risiko einer Patellafraktur [20, 21].

Hamstrings STG

Das initial viel postulierte Argument zur Verwendung der Hamstrings war die hohe Reißfestigkeit des Transplantates (ca. 4000 N, im Vergleich Patellarsehne: ca. 2900 N / natives vorderes Kreuzband: ca. 2000 N). Dies ist natürlich heute nur noch sekundär, da allgemein bekannt ist, dass es nicht die Reißfestigkeit des Transplantates ist, sondern vor allem die Stabilität der primären ossären Verankerung. Heutige objektive Kriterien zur Verwendung der Hamstrings sind vor allem, dass mehrsträngige Sehnen-Transplantate besser in der Lage sind, das komplexe mehrbündelige vordere Kreuzband zu ersetzen und so die komplizierte Kinematik des Kniegelenkes zu rekonstruieren [22, 23]. Zusätzlich ist auch die geringere Entnahmemorbidität und die Vermeidung eines Traumas des Streckapparates anzuführen [24]. Subjektiv sind aber auch in der heutigen Zeit die kosmetischen Vorteile nicht abzuweisen. Nachteile bei der Verwendung von Hamstringsehnen zeigen sich in einer geringeren Verankerungsstabilität bzw. in einer länger dauernden Einheilung im Knochentunnel sowie in einer möglichen Transplantatelongation [25]. Kontrovers diskutiert wird der Kraftverlust der Ischiokruralen Muskulatur und die damit verbundene Einschränkung von Flexion und Innenrotation im Kniegelenk [26, 27]. Auch nimmt man eine Schädigung der dynamischen medialen Stabilisatoren am Knie in Kauf. Dies führte zur Empfehlung, wenn möglich nur die Semitendinosussehne zu benutzen und den Gracilis in situ zu belassen. Es konnte gezeigt werden, dass dadurch die

Schwäche der Ischiokruralen Muskulatur deutlich geringer ausgeprägt ist und nach 6 Monaten nicht mehr nachgewiesen werden kann [28].

Quadricepssehne

Einige wenige Langzeitergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse mit denen des BTB und den STG vergleichbar sind [29, 30, 31]. Vorteil ist die variable Entnahmemöglichkeit. Vor allem in der Revisionschirurgie hat die Quadricepssehne ihren Platz gefunden. Dort, wo schon bereits andere Transplantate entnommen wurden und auch die ossären Verhältnisse prekär sind, ist ein Transplantat willkommen, wo die Dicke und Länge frei gewählt werden können. Jedoch ist bei der Fixationstechnik zu berücksichtigen, dass nur an einer Seite ein Knochenblock vorliegt. Zudem entsteht hier ebenfalls eine Läsion des Streckapparates, was zu einer gewissen Schwäche führt.

Allografts

Eine im Aufwind bestehende Philosophie. Heutzutage werden Allografts zur primären Rekonstruktion vor allem in den USA verwendet. Dort haben sie ihren Platz neben den autologen Transplantaten eingenommen. Insbesondere kommen Patellarsehnen oder die Achillessehne zur Anwendung. Der grosse Vorteil ist die fehlende Entnahmemorbidität und die unbegrenzte Verfügbarkeit. Auch kann die Operationszeit dadurch verkürzt werden. Ein gewisser Angstfaktor vor einer Abstoßungsreaktion bzw. einer schwerwiegenden Infektion zu erlangen, bleibt dennoch bestehen. Obschon dies durch die moderne Infekt-Diagnostik und die strengen behördlichen Auflagen prinzipiell ausgeschlossen werden kann. Auch unklar ist noch immer das Integrationsverhalten des Transplantates, und es fehlen Langzeitstudien über die Ligamentisierung. Problematisch ist vor allem der Sterilisationsprozess. Diesbezüglich ist ein Umdenken auf fresh frozen Allografts zu verzeichnen. Obwohl erste Ergebnisse sehr vielversprechen sind, besteht jedoch noch ein massiver Klärungsbedarf [32, 33]. In Europa

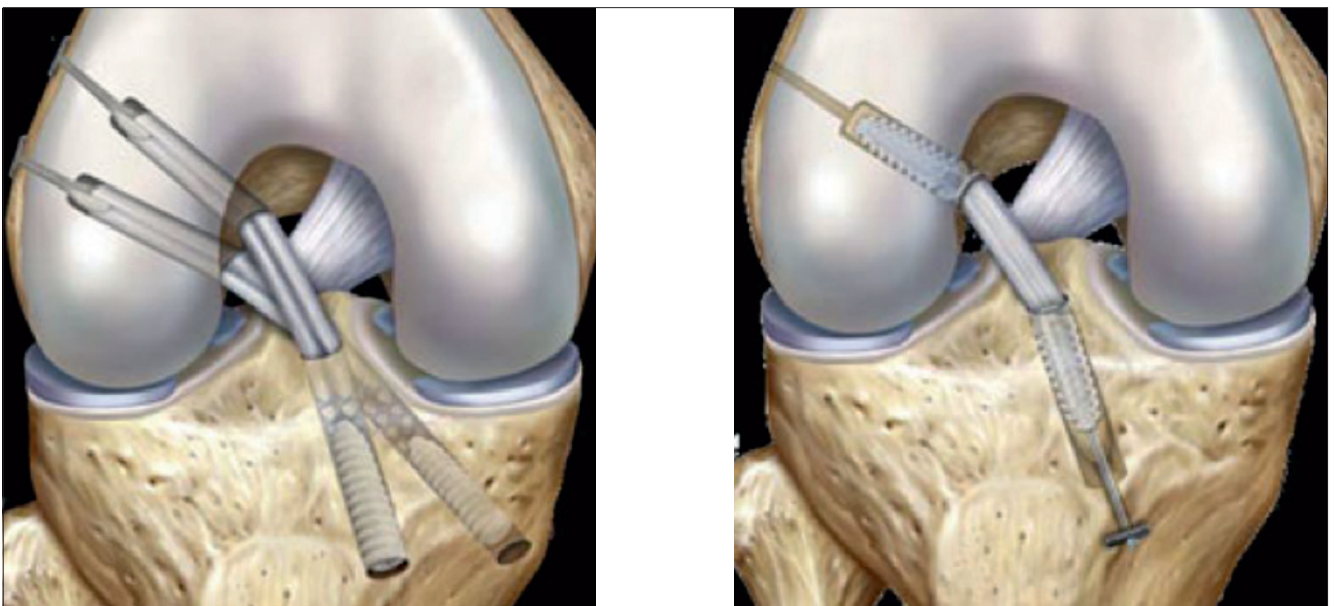


Abbildung 1: Anatomische Rekonstruktion, links Einzelbündeltechnik und rechts Doppelbündeltechnik.

werden Allografts vor allem in der Revisionschirurgie verwendet. Des Weiteren ist in Zeiten von DRG der hohe Kostenfaktor ein entscheidender Diskussionspunkt.

Anatomische VKB-Rekonstruktion

Die Frage, ob die Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands als single-bundle oder doch als double-bundle erfolgen soll, beschäftigt uns seit Längerem. Sie ist aber nur ein Teilaspekt in der grossen Diskussion über das «richtige» Rekonstruktionsverfahren. Ziel sollte es in der heutigen Zeit sein, den individuellen anatomischen Verlauf des VKB zu rekonstruieren. Diesbezüglich wurde die Transtibiale Technik zur Anlage des femoralen Bohrkanal, zunehmend verlassen, da es hierbei nicht möglich ist, den korrekten Eintrittspunkt femoral zu erreichen. Biomechanisch resultierte daraus eine verminderte Rotationsstabilität. Jedoch objektiv betrachtet, sind die klinischen Unterschiede nicht so gravierend, wie man denkt [34].

Eine viel verbreitete Philosophie ist die der double-bundle-Technik. Hier wird versucht, beide Bündel der VKB anatomisch zu rekonstruieren, um die Morphologie optimal wiederherzustellen. Theoretisch und praktisch, wenn korrekt durchgeführt, ist dies auch der Fall. Jedoch sind die Vorteile für den Patienten noch nicht zu 100% geklärt. Eine signifikante Überlegenheit zur single-bundle-Technik konnte nicht gezeigt werden [35, 36, 37]. Ganz aktuell wird der Einsatz der double-bundle-Technik vor allem bei Patienten mit einer relativ grosser Notch diskutiert. Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass diese Patienten auf mehr Rotationsstabilität angewiesen sind, welche durch die Doppelbündeltechnik erwiesener Massen erreicht wird [38, 39] (Abb. 1). Nachteilig zeigt sich einerseits bei der Doppelbündeltechnik, dass es nötig ist, beide Hamstringsehnen zu entnehmen, andererseits ist die Operation technisch anspruchsvoll. Eine absolut perfekte Platzierung der vier Bohrkanäle ist ein Schlüsselfaktor zum korrekten Resultat. Dies zusammen waren unter anderem Gründe, dass die anatomische Einzelbündeltechnik in den letzten Jahren einen Aufwind erhielt. Zum Standard ist hierbei die Verwendung der Hamstrings geworden. Die oftmals ausreichende alleinige Verwendung des Semitendinosus ist dabei ein grosser Vorteil. Somit kann die Schädigung der Ischiokruralen Muskulatur und der dynamischen medialen Stabilisatoren reduziert werden. Auch hier ist der Schlüsselfaktor die korrekte individuelle anatomische Platzierung der Bohrkanäle. Femoral ist dabei ein tiefes anteromediales Portal unbedingt nötig. Auch muss man sich vor der Operation versichern, dass das Knie auf ca. 120 Grad zur Anlage des femoralen Bohrkanals flektiert werden kann. Zum Setzen der Führungsdrähte stellt uns die Industrie diverse Zielgeräte zur Verfügung. Man sollte diese jedoch lediglich als Hilfsmittel ansehen. Eine genügende arthroskopische Visualisierung der Kreuzbandinsertionen sowie die nachfolgende Platzierung der Führungsdrähte und die der Bohrkanäle sind zwingend nötig. Ebenfalls muss darauf geachtet werden, dass es beim Einführen des femoralen Bohrers nicht zu einer Verletzung des Knorpels an der medialen Kondyle kommt. In komplexen Situationen ist es hilfreich, eine intraoperative fluoroskopische Evaluation durchzuführen.

Fixation des Transplantates

Es ist nicht die Reisskraft des Transplantates, wie in der Vergangenheit vermutet, sondern die initiale Verankerung,



Abbildung 2: Ligamys-Implantat, bestehend aus intraligamentärem Polyethylenband, Kippanker, Schraubenhülse mit integrierter Feder.

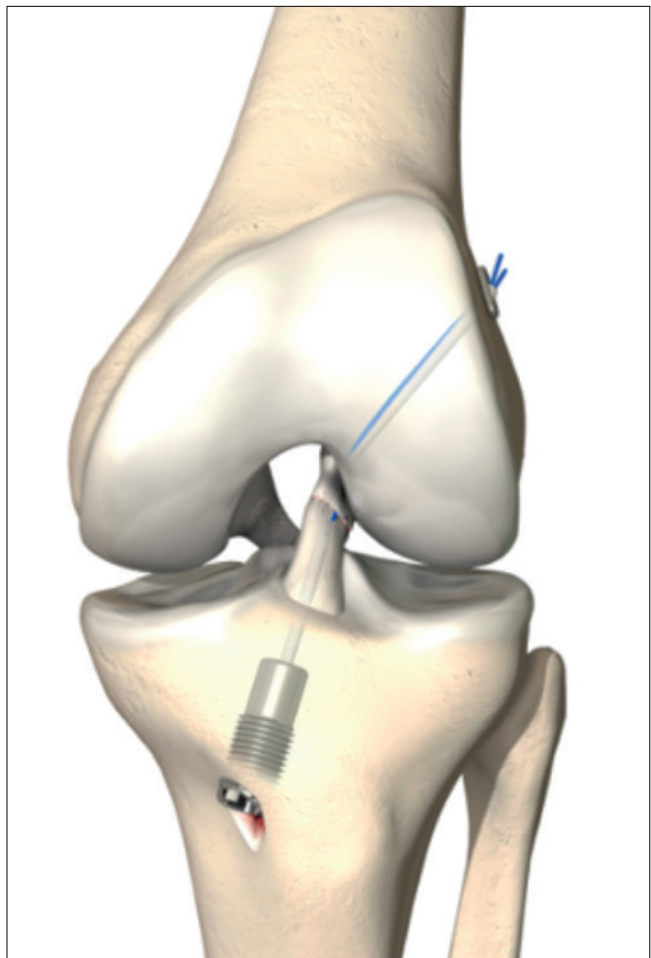


Abbildung 3: Schema Dynamische Intraligamentäre Stabilisation mit Ligamys-Implantat.

welche ausschlaggebend für die Stabilität während der postoperativen Rehabilitation ist. Durch die immer schnellere und aggressivere Nachbehandlung sowie die steigenden Erwartungen unserer Patienten gewinnt die sichere und stabile Fixation zunehmend an Bedeutung.

Die erforderliche Verankerungsfestigkeit muss sich an der Belastung des vorderen Kreuzbandes unter den Aktivitäten des täglichen Lebens orientieren. Im Kadaver gemessene Belastungen und mathematische Berechnungen geben uns dabei Ausreisskräfte von ca. 50 bis 450 N [28, 40, 41]. Grundsätzlich zu unterscheiden sind anatomische Fixationsmethoden mit Verankerung des Transplantates am Eintrittspunkt des Bohrkanals (z.B. Interferenzschrauben) und Fixationsmethoden mit gelenkferner Fixation (z. B. Flip Anker). Durch die Fixation mit Interferenzschrauben kann eine initiale Verankerungsfestigkeit von 400–500 N erzielt werden [42]. In zunehmendem Masse werden resorbierbare Interferenzschrauben verwendet (z.B. Milagro, Fa. Mitek; Mega Fix, Fa. Storz). Allerdings benötigen auch resorbierbare Schrauben mehrere Jahre Resorptionszeit. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Transplantatsschädigung durch das Eindrehen der Schraube. Wenn möglich sollte vor allem femoral vor dem Eindrehen mit einem Meissel ein paralleler Knochenspan zum Schutz des Transplantates kreiert werden. Dadurch wird die Fixationskraft verstärkt und ebenfalls ein Drehen des Transplantates um die Schraube verhindert. Die Semitendinosussehne wird häufig nichtanatomisch, extrakortikal mit Staples oder Flip Anker («Endo-Button», Fa. Smith & Nephew, «Suture Plate», Fa. Aesculap) fixiert. Hierdurch entstehen teilweise Transplantat-Tunnelbewegungen, welche theoretisch eine Einheilung des Transplantates erschweren (Scheibenwischer-effekt) [43]. Dies wird aber sehr kontrovers diskutiert, und eine klinische Relevanz ist nicht bestätigt [44]. Biomechanisch kann die Transplantattunnelbewegung durch eine zusätzliche gelenknahe Fixation der Sehne (Hybridfixation mit Interferenzschraube) minimiert werden [45]. Als Alternative für die femorale Fixation kann ein Transfixationssystem verwendet werden, welches von lateral durch das Transplantat eingebracht wird, wodurch eine sehr gelenknahe Verankerung

erzielt wird (z.B. «Rigid Fix», Fa. Mitek, «Transfix», Fa. Arthrex).

Blick in eine mögliche Zukunft

Objektiv betrachtet ist der Stand der heutigen Kreuzbandchirurgie nicht weit von derjenigen zu Brückners Zeiten (1966) entfernt. Wir haben zwar in den letzten Jahren gewisse technische Verbesserungen entwickelt und aus unseren Fehlern gelernt, aber wahre Meilensteine gab es wenige. Wir denken noch immer, das vordere Kreuzband könne nicht von selbst heilen.

Aber warum nicht? Es ist halt eine bewiesene Tatsache, ein Paradigma und deshalb wird jährlich mehrere tausend Mal eine vitale Struktur namens Vorderes Kreuzband einfach entfernt und durch eine avitale Struktur namens Transplantat ersetzt. Man ist der Auffassung, dass dieses tote, zusammengeknäute Etwas aus einem oder zwei Sehnensträngen die anatomische dreidimensionale Morphologie eines vitalen aus mehreren Dutzend Faszikeln bestehenden Ligaments mit wichtigen sensomotorischen Funktionen wiederherstellen kann. Dieses ist doch eher eine Wunschvorstellung?

Die einfachste Lösung des Problems, wäre die Selbstheilung der Vorderen Kreuzbandruptur. Nur das funktioniert ja bekanntermassen nicht. Oder doch?

Wenn man die bei der Primärnaht begangenen Fehler der Vergangenheit betrachtet und mit den heutigen Erkenntnissen kombiniert, kristallisieren sich letztlich zwei Probleme heraus, die nicht gelöst wurden. Einerseits braucht jede vitale Struktur eine gewisse Ruhezeit zum Heilen, und es muss zweitens ein Milieu bestehen, in dem eine biologische Aktivität entstehen kann [46]. Nach einer VKB-Ruptur wird jedoch bei jeder Kniebewegung eine bis zu 15 mm grosse Distanz zwischen den Stümpfen aufgebaut. Bei fehlendem Kontakt der Stümpfe und ständiger Bewegung, degenerieren diese zu dem uns bekannten Bild der Chronischen VKB-Ruptur. Auf die Frage, wie diese Probleme gelöst werden können, sind wir im Folgenden eingegangen.

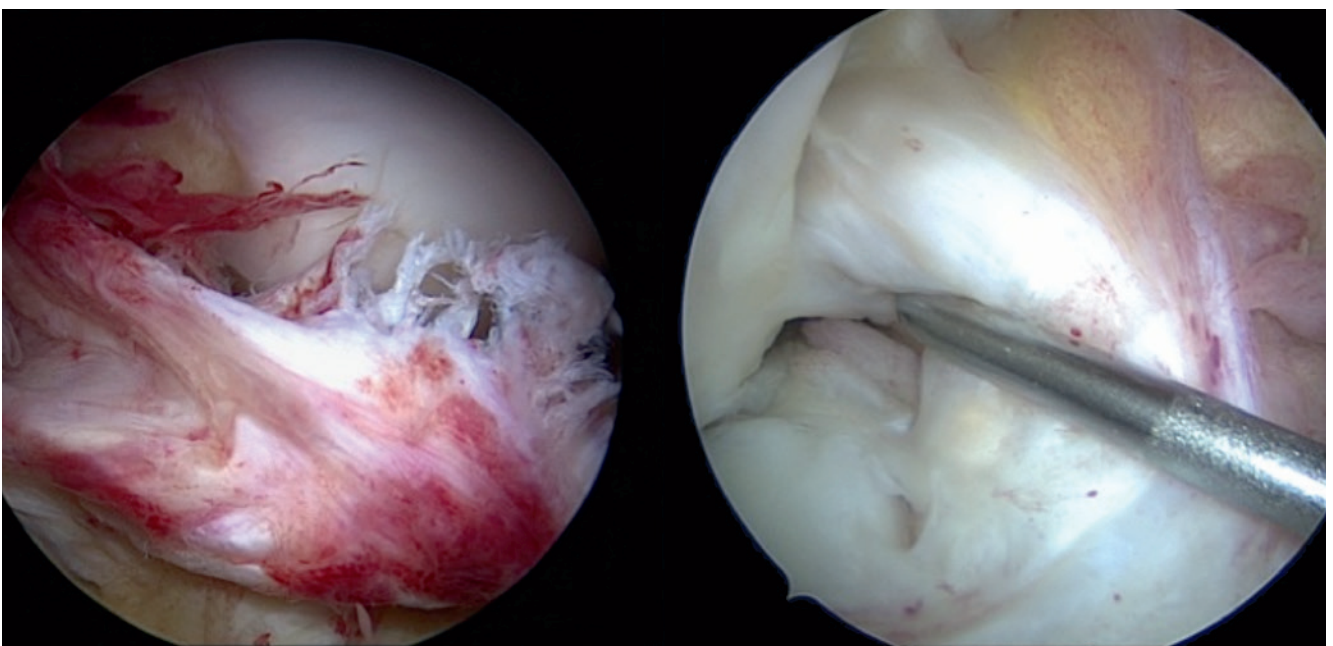


Abbildung 4: Links: akute intraligamentäre VKB Ruptur; Rechts: selber Patient 6 Monate nach DIS mit geheiltem VKB

Dynamische Intraligamentäre Stabilisation

In Zusammenarbeit mit der Firma Mathys AG in Bettlach haben wir eine OP-Technik und ein Implantat entwickelt, welches die genannten Probleme angeht. Das gerissene Kreuzband wird dabei temporär durch ein dynamisches Implantat (Ligamys) (Abb. 2) «geschient», um die Selbstheilung bei gleichzeitig erhaltener Mobilität des Kniegelenks zu ermöglichen. Nach erfolgreicher Testung dieser Technik in einer Grosstierstudie wurde das Implantat und die Operationstechnik für den Humanen Einsatz angepasst [47].

Das Ligamys-Implantat besteht aus einem Polyethylenband, das zentral im VKB liegt, am Femur statisch sowie in der Tibia über ein dynamisches Federsystem verankert wird. (Abb. 3). So wird die notwendige innere Ruhe und Stabilität des Kniegelenks erreicht, die zur Ausheilung des Kreuzbandrisses erforderlich ist. Des Weiteren wird der distale VKB-Stumpf mit dünnen resorbierbaren Hilfsfäden (PDS 2.0) dem Proximalen angenähert. Zur Unterstützung der biologischen Heilung wird zusätzlich eine Mikrofrakturierung der femoralen Insertion durchgeführt [48, 49]. Dadurch sollen körpereigene Wachstumsfaktoren und Stammzellen lokal an die Stumpfen gebracht werden, welche die Heilung unterstützen. Vor allem bei intraligamentären Rupturen, ohne bestehenden Synovialschlauch, wird zusätzlich eine Kollagenmembran über die Rupturstelle fixiert. Die gesamte Operation wird in Anlehnung an die Standard-VKB-Plastik arthroskopisch assistiert durchgeführt.

Im Rahmen einer prospektiven Studie, die aktuell auf eine Europäische Multizenterstudie ausgeweitet wurde, evaluieren wir die klinischen und radiologischen Resultate dieser Behandlungsmethode, bei Akuter VKB-Ruptur (nicht älter als drei Wochen). Bis dato wurden in den letzten 3 Jahren mehr als 300 dieser Operationen durchgeführt. Die ersten Ergebnissen sind sehr vielversprechend. Vor der Ruptur hatten alle Patienten ein subjektiv normales Kniegelenk sowie anamnestisch einen Lysholm- und IKDC-Score von je 100, der Tegnerscore betrug 5,1 (Range 4–9).

Bereits 6 Monate postoperativ betrug der Lysholm-Score 97, der IKDC-Score 95 und der Tegnerscore bei 4,9 (Range 4–9). Einen erfolgreichen Back-to-Sport-Test (90 % Funktion und Kraft des gesunden kontralateralen Beines) absolvierten bereits 84 % der sportlich ambitionierten Patienten nach 4,5 Monaten. Nach 12 Monaten zeigten die klinischen Scores annähernd Werte wie vor der VKB-Ruptur. MRT-Untersuchungen zeigten ebenfalls nach 6 und 12 Monaten eine regelrechte Heilung des Vorderen Kreuzbandes (Kühne Grad A/Howel Grad I). Die leicht vermehrte AP-Translation zur gesunden Gegenseite von 2,1 mm (–2 bis +4 mm) hat subjektiv für die Patienten keinen Einfluss (Abb. 4). Eine persistierende objektive Instabilität trat nur bei fünf der Patienten auf. Bei diesen, wie auch bei sieben traumatischen Rupturen wurde eine konventionelle VKB-Ersatzplastik durchgeführt. Die Subjektive Patientenzufriedenheit (VAS 0–10) lag bei den DIS-Patienten bei 8,9 Punkten nach 6 Monaten und bei 9,7 Punkten nach 12 Monaten.

Definitive Aussagen und Empfehlungen können damit jedoch noch nicht getroffen werden. Wir können aber mit unserer Arbeit beweisen, dass das Vordere Kreuzband, entgegen der vorherrschenden Meinung ein genügendes Selbstheilungspotenzial hat. Klinisch kristallisiert sich ebenfalls immer mehr ein Vorteil heraus. Bis dato ist die DIS-Technik nur bei akuter Vorderer Kreuzbandruptur möglich. Jedoch sind auch heute schon sehr interessante Ansätze vorhanden, die

ebenfalls in Richtung der Biologischen Regeneration von chronischen VKB-Rupturen gehen.

Ob die Dynamische Intraligamentäre Stabilisation sich etablieren wird und einen Paradigmenwechsel in der Kreuzbandchirurgie einleitet, wird die Zukunft zeigen.

Korrespondenzadresse:

Dr. med. Sandro Kohl, Leiter Knie- und Sportorthopädie, Universitätsklinik für Orthopädische Chirurgie und Traumatologie, Inselspital, 3010 Bern, Schweiz, Telefon +41 (0) 31 632 37 01, E-Mail: sandro.kohl@insel.ch

Referenzen

1. Robson AW: Ruptured crucial ligaments and their repair by operation. *Ann Surg* (1903) 716–718.
2. Hesse, E.: Über den Ersatz der Kreuzbänder des Kniegelenkes durch freie Sehnenstreifen. *Verh Dtsch Ges Chir* 43 (1914) 188–189.
3. Hey-Groves, E. W.: Operation for repair of the crucial ligament. *Lancet* 2 (1917) 674.
4. Zur Verth: Aussprache 27. Kongress 5.–7. Sept 1932, Mannheim. *Verh Dtsch Orthop Ges* (1933) 268–270.
5. Jones KG: Reconstruction of the ACL. *J Bone Joint Surg Am* 45 (1963) 925–932.
6. Brückner H: Eine neue Methode der Kreuzbandplastik. *Chirurg* 37 (1966) 413–414.
7. Feagin J, Curl W. Isolated tear of the anterior cruciate ligament. 5-years follow-up study. *Am J Sports Med* 1976; 4: 95–100.
8. Frank CB, Jackson DW. Current concepts review - the science of reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am* 1997; 79: 1556–157.
9. Buchmann S, Musahl V, Imhoff AB, Brucker PU. Allografts for cruciate ligament reconstruction. *Orthopade* 2008; 37: 772–778.
10. Dandy DJ. Arthroscopic surgery of the knee. *TBR J Hosp MedT* 1982; 27: 360, 362, 365.
11. Freedman KB, D'Amato MJ, Nedeff DD, Kaz A, Bach BR Jr. Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: a metaanalysis comparing patellar tendon and hamstring tendon autografts. *T T Am J Sports Med* 2003; 31: 2–11.
12. 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.
13. Herrington L, Wrapson C, Matthews M, Matthews H. Anterior cruciate ligament reconstruction, hamstring versus bone-patella tendon-bone grafts: a systematic literature review of outcome from surgery. *Knee* 2005; 12:41–50.
14. Sajovic M, Vengust V, Komadina R, Tavcar R, Skaza K. A prospective, randomized comparison of semitendinosus and gracilis tendon versus patellar tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: five-year follow-up. *T Am J Sports MedT* 2006; 34: 1933–1940.
15. West RV, Harner CD. Graft selection in anterior cruciate ligament reconstruction. *J Am Acad Orthop Surg* 2005; 13: 197–207.
16. Eriksson K, Anderberg P, Hamberg P, Löfgren AC, Bredenberg M, Westman I, Wredmark T. A comparison of quadruple semitendinosus and patellar tendon grafts in reconstruction of the acl. *J Bone Joint Surg Br* 2001; 83: 348–354
17. Shaieb MD, Kan DM, Chang SK, Marumoto JM, Richardson AB. A prospective randomized comparison of patellar tendon versus semitendinosus and gracilis tendon autografts for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2002; 30: 214–220.
18. Rosenberg J, Franklin J, Baldwin G, Nelson K: Extensor mechanism function after patellar tendon graft harvest for ACL reconstruction. *Am J Sports Med* 20 (1990) 519–525.
19. Höher J, Tiling T. Differential transplant selection in cruciate ligament surgery. *Chirurg* 2000; 71: 1045–1054.
20. Chouteau J, Laptioiu D, Lerat JL, Moyon B. Patellar fracture after anterior cruciate ligament reconstruction using a bone patellar tendon bone

- transplant: a comparative study of two harvesting techniques. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2008; 94: 561–565.
21. Tay GH, Warriar SK, Marquis G. patella fractures following ACL reconstruction: a review. *Acta Orthop* 2006; 77: 494–500.
 22. Essen von H, Südkamp NP. Das Komplextrauma des Kniegelenks. Diagnostik und Therapie ligamentärer Verletzungen. *Unfallchirurg* 2003; 106: 398–411.
 23. Becker R, Röpke M, Nebelung W. Die vordere Kreuzbandplastik – Transplantatwahl und Verankerungstechniken. *Zentralbl Chir* 2002; 127: 842–849.
 24. Poolman RW, Farrokhyar F, Bhandari M. HHHT amstring tendon autograft better than bone patellar-tendon bone autograft in ACL reconstruction: a cumulative meta-analysis and clinically relevant sensitivity analysis applied to a previously published analysis. *Acta OrthopT* 2007; 78: 350–354.
 25. Burger C, Prokop A, Andermahr J, Jubel A, Rehm KE. 100 Jahre Kreuzbandchirurgie: Die Beantwortung der wichtigsten Fragen in der Literatur der 90er Jahre. *Akt Traumatol* 2000; 30: 73–87.
 26. Weiler A, Schefflers S, Höher J. Transplantatwahl für den primären Ersatz des vorderen Kreuzbandes. *Orthopade* 2002; 31: 731–740.
 27. Fu FH, Schulte KR. Anterior cruciate ligament surgery 1996. State of the art? *Clin Orthop Relat Res* 1996; 325: 19–24.
 28. Noyes FR, Butler DI, Grood ES, Zernicke RF, Hefzy MS: Biomechanical analysis of human ligament grafts used in knee-ligament repairs and reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 66 (1984) 344–352.
 29. Han HS, Seong SC, Lee S, Lee MC. Anterior cruciate ligament reconstruction: quadriceps versus patellar autograft. *Clin Orthop Relat Res*. 2008; 466(1): 198–204.
 30. Kim SJ, Kumar P, Oh KS. Anterior cruciate ligament reconstruction: autogenous quadriceps tendon-bone compared with bone-patellar tendon-bone grafts at 2-year follow-up. *Arthroscopy*. 2009; 25(2): 137–144.
 31. Geib TM, Shelton WR, Phelps RA, Clark L. Anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps tendon autograft: intermediate-term outcome. *Arthroscopy*. 2009; 25(12): 1408–1414.
 32. Sun K, Tian SQ, Zhang JH, Xia CS, Zhang CL, Yu TB. Anterior cruciate ligament reconstruction with bone-patellar tendon-bone autograft versus allograft. *Arthroscopy*. 2009; 25(7): 750–759.
 33. Carey JL, Dunn WR, Dahm DL, Zeger SL, Spindler KP. A systematic review of anterior cruciate ligament reconstruction with autograft compared with allograft. *J Bone Joint Surg Am*. 2009 ;91(9): 2242–2250.
 34. Alentorn-Geli E, Lajara F, Samitier G, Cugat R. The transtibial versus the anteromedial portal technique in the arthroscopic bone-patellar tendon-bone anterior cruciate ligament reconstruction. *J Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2010 Aug; 18(8): 1013–37.
 35. Muneta T, Koga H, Mochizuki T, et al. A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques. *Arthroscopy*. 2007; 23(6): 618–628.
 36. Park SJ, Jung YB, Jung HJ, et al. Outcome of arthroscopic single-bundle versus double-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament: a preliminary 2-year prospective study. *Arthroscopy*. 2010; 26(5): 630–636.
 37. Song EK, Oh LS, Gill TJ, Li G, Gadikota HR, Seon JK. Prospective comparative study of anterior cruciate ligament reconstruction using the double-bundle and single-bundle techniques. *Am J Sports Med*. 2009; 37(9): 1705–1711.
 38. Meredick RB, Vance KJ, Appleby D, Lubowitz JH. Outcome of single-bundle versus double-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Am J Sports Med*. 2008; 36(7): 1414–1421.
 39. 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.
 40. Woo SLY, Hollis JM, Adams DJ, Lyon RM, Takai S. Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex. The effects of specimen age and orientation. *Am J Sports Med* 1991; 19(3): 217–225.
 41. Shelburne KB, Pandy MG, Torry MR. Comparison of shear forces and ligament loading in the healthy and ACL-deficient knee during gait. *J Biomech* 2004; 37(3): 313–319.
 42. KohnD,RoseC:Primarystabilityofinterferencescrewfixation.Influence of screw diameter and insertion torque. *Am J Sports Med* 22 (1994) 334–338.
 43. Sabat D, Kundu K, Arora S, Kumar V. Tunnel widening after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective randomized computed tomography--based study comparing 2 different femoral fixation methods for hamstring graft. *Arthroscopy*. 2011 Jun; 27(6): 776–83.
 44. Choi NH, Oh JS, Jung SH, Victoroff BN. Correlation between endobutton loop length and tunnel widening after hamstring anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*. 2013 Jan; 41(1): 101–6.
 45. Weiler A, Scheffler S, Südkamp NP: Aktuelle Aspekte in der Verankerung von Hamstring-Transplantaten in der Kreuzbandchirurgie. *Chirurg* 71 (2000) 1034–1044.
 46. Murray MM. Current status and potential of primary ACL repair. *Clin Sports Med* 2009; 28(1): 51–61.
 47. Kohl S, Evangelopoulos DS, Kohlhof H, Hartel M, Bonel H, Henle P, Eggli S. Anterior cruciate ligament rupture: self-healing through dynamic intraligamentary stabilization technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012 Mar 23.
 48. Steadman JR, Cameron-Donaldson ML, Briggs KK, Rodkey WG. A minimally invasive technique («healing response») to treat proximal ACL injuries in skeletally immature athletes. *J Knee Surg* 2006; 19(1): 8–13.
 49. Steadman JR, Rodkey WG. Role of primary anterior cruciate ligament repair with or without augmentation. *Clin Sports Med* 1993; 12(4): 685–95.