

# Evidenz in der Behandlung des rupturierten Kreuzbandes beim Kind und Jugendlichen

Vavken P<sup>1,2,3</sup>, Erggelet C<sup>1</sup>

<sup>1</sup>alphaclinic Zürich, Zürich

<sup>2</sup>Division of Orthopaedic Surgery, Children's Hospital Boston, Harvard Medical School, Boston, MA, USA

<sup>3</sup>Harvard Center for Population and Development Studies, Harvard School of Public Health, Boston, MA, USA

## Abstract

ACL injuries in children and adolescents have increased substantially in recent years. Nevertheless, treatment algorithms are dominated by prejudice more than by evidence, even though the scientific basis, summarized in this paper, is sound. The likelihood of an ACL tear in a traumatic hemarthrosis, even without contact, is 52%. More than half of the cases show concurrent injuries. Methods and criteria for success of conservative treatment are published in detail, however, surgical treatment produces a better clinical outcome in most cases. Various surgical techniques exist, and age appropriate treatment can eliminate the risk of a growth disturbance and restore the normal function of the knee.

Keywords: ACL, pediatric, adolescent, growth, evidence, surgery

## Zusammenfassung

Kreuzbandverletzungen im Kindes- und Jugendalter haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Trotzdem werden die Behandlungsschemata eher durch Vorurteile als durch Evidenz dominiert, obwohl die wissenschaftliche Datenlage gut fundiert ist. Diese wird in diesem Paper zusammengefasst. So ist die Wahrscheinlichkeit einer VKB-Ruptur bei einem traumatischen Hämarthros, auch ohne Kontakt, 52%. Mehr als die Hälfte der Fälle zeigen weitere Begleitverletzungen. Methoden und Erfolgskriterien für konservative Therapie sind detailliert publiziert, obschon eine operative Therapie in den meisten Fällen ein besseres klinisches Ergebnis zeigt. Verschiedene Operationstechniken existieren, und bei altersgerechter Behandlung kann das Risiko einer Wachstumsstörung eliminiert und die Funktion des Knies normalisiert werden.

Schlüsselwörter: Kreuzband; Kind; Jugendliche; Wachstum; Evidenz; Operation

## Inzidenz und Epidemiologie von Kreuzbandverletzungen bei Kindern und Jugendlichen

Kreuzbandverletzungen bei Kindern und Jugendlichen haben in den letzten Jahren schleichend zugenommen. Verschiedene staatliche und akademische Register haben harte Daten zur Inzidenz von Kreuzbandverletzungen gesammelt. Die MOON (Multicenter Orthopaedic Outcomes Network) und MARS (Multicenter ACL Revision Study) Studien, aber auch die skandinavischen Registerstudien sind nur Beispiele, welche Daten zu mehreren Tausend Fällen aufgearbeitet haben [1–4].

Aus diesen Studien wissen wir, dass sich in den letzten Jahren das mediane Alter für eine VKB-Ruptur auf 15 Jahren reduziert hat, sowohl in den USA als auch europäischen Ländern. Knapp 80% davon sind Non-Kontakt-Verletzungen. Aus anderen Untersuchungen wissen wir um eine 400% Zunahme der Inzidenz von VKB-Rupturen in unter 15-Jährigen – und zwar tatsächliche Rupturen und nicht knöcherne Avulsionen [5]. Als Ursache wird die vermehrte Teilnahme bei und höhere Intensität von organisiertem Sport angenommen. Laut dem «Sport Schweiz Kinder und Jugendbericht 2014» sind 62% aller 10–14 Kinder in der Schweiz in einem Sportverein aktiv ([http://www.baspo.admin.ch/content/baspo-internet/de/dokumentation/publikationen/sport-schweiz-2014/\\_jcr\\_content/contentPar/downloadlist\\_copy\\_co/downloadItems/571\\_1464186255775.download/sport\\_schweiz\\_2014\\_kinder\\_und\\_jugendbericht\\_d.pdf](http://www.baspo.admin.ch/content/baspo-internet/de/dokumentation/publikationen/sport-schweiz-2014/_jcr_content/contentPar/downloadlist_copy_co/downloadItems/571_1464186255775.download/sport_schweiz_2014_kinder_und_jugendbericht_d.pdf)). Derselbe Bericht zeigt auf, dass 20% aller sporttreibenden Kinder in der Schweiz einmal pro Jahr eine Verletzung haben, die vom Arzt behandelt werden muss.

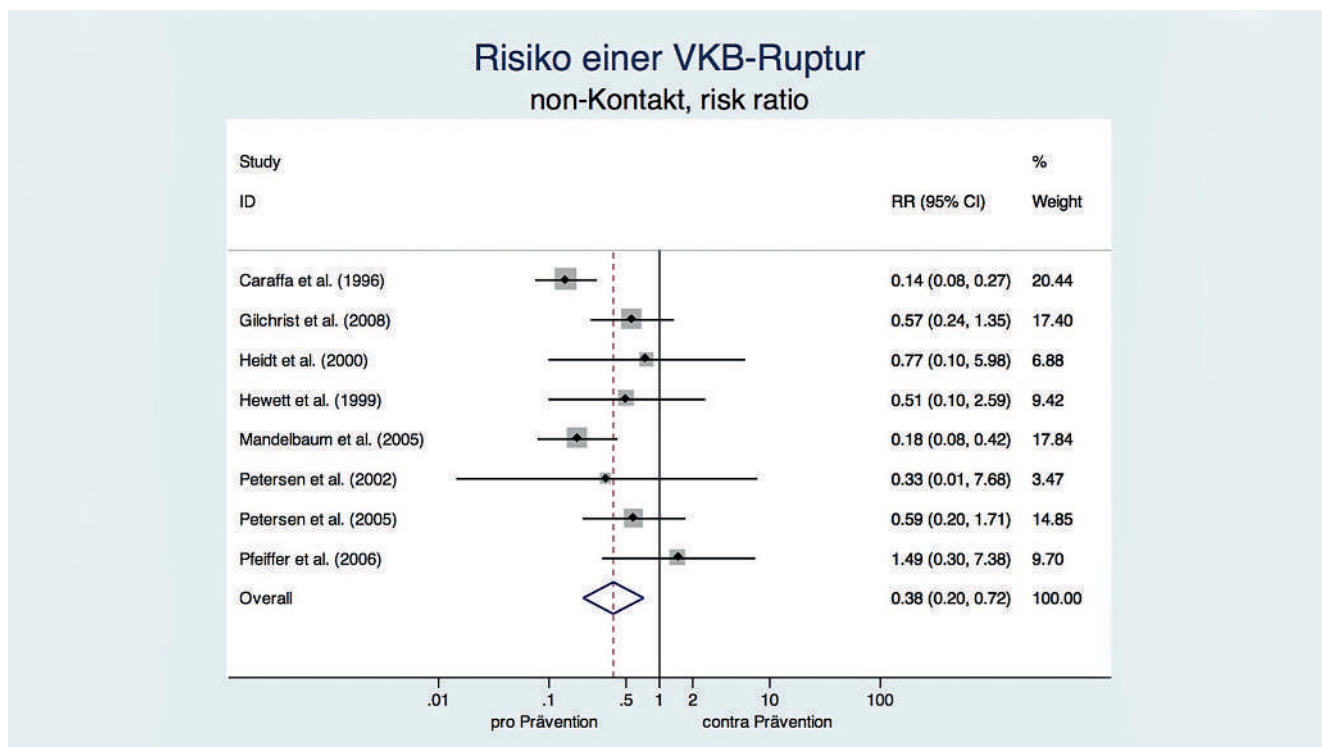
Genau wie beim Erwachsenen kann eine VKB-Ruptur im Wachstumsalter eine (Rotations-)Instabilität des Knies nach sich ziehen. Diese ist als Risikofaktor für eine spätere Arthrose gut dokumentiert. Mehrere Studien haben einen An-

stieg arthrotischer Befunde 10–14 Jahre nach VKB-Ruptur dokumentiert [6]. Dieses Faktum ist natürlich umso bedeutender, wenn die VKB-Ruptur nicht mit Ende 20, sondern mit 11 Jahren passiert. Parallel dazu wächst das Knie im Jugendalter noch, die Wachstumsfugen schliessen sich bei Knaben zwischen 13–15 Jahren, bei Mädchen zwischen 16–18 Jahren. Bis dahin kommen 65% des Längenwachstums der unteren Extremität aus den Wachstumsfugen rund um das Knie.

## Prävention von VKB-Rupturen

Die wichtigste und effektivste Behandlung der Ruptur des vorderen Kreuzbandes ist die Vermeidung eines solchen Unfalls. 80% der Kreuzbandrupturen geschehen im Rahmen von Non-Kontakt-Verletzungen, d.h. ohne das Einwirken von Dritten, sondern durch Valgusstress, Hyperextension oder direkten Vorschub des Unterschenkels in Relation zum Femur. Eine Reihe von Präventionsprogrammen existieren, die auf diese Mechanismen abzielen, indem sie bekannte Risikofaktoren für eine VKB-Ruptur – ein Missverhältnis zwischen Quadriceps und Hamstrings, einen vermehrten dynamischen Valgus, eine zu enge Fussstellung beim Landen usw. – auszuschalten versuchen. Eine Meta-Analyse dieser Programme zeigte eine signifikante Reduktion der Inzidenz von VKB-Rupturen mit einer pooled risk ratio von 0.32 (entsprechend 68% Risikoreduktion) respektive eine Number-Needed-to-Treat (NNT) von 38 für Non-Kontakt-VKB-Rupturen [7] (Abb. 1). Leider sind diese Programme nicht weit verbreitet. Die FIFA hat ihr Programm FIFA 11+ online als Poster in einer Reihe von Sprachen zum freien Download verfügbar gemacht.

Gegenwärtig gibt es keine Evidenz, dass der Gebrauch von Schienen die Inzidenz von Kreuzbandrupturen reduziert [8].



**Abbildung 1:** Der Forest-Plot aus der Meta-Analyse der Präventionsprogramme für VKB-Rupturen. Die einzelnen Studien sind gelistet, der Diamant zeigt das gewichtete Summenergebnis pro Prävention mit einer Risk Ratio von 0.32.

## Inzidenz von Begleitverletzungen

Ein wichtiger Parameter in der Entscheidungsfindung in der Behandlung einer VKB-Ruptur sind Begleitverletzungen, wie instabile Meniskusrupturen und akute Knorpelschäden, da diese eine zeitgerechte operative Therapie und ein stabiles Knie zur Ausheilung benötigen. Eine aktuelle Studie über 208 skeletal unreife Patienten (mittleres Alter 15 Jahre) mit VKB-Ruptur zeigte Begleitverletzungen in 56% der Fälle [9]. Das Risiko einer Begleitverletzung stieg pro Punkt BMI um 10% und pro Woche zwischen Verletzung und Untersuchung um 2%. Obwohl dies kein eigentlicher Endpunkt der Studie war, zeigte sich eine verhältnismässig hohe Rate an falsch-negativen MRI-Befunden, speziell was Meniskusverletzungen betrifft (persönliche Kommunikation). Eine andere Studie mit 370 Patienten bestätigt diese Ergebnisse [10]. Für Avulsionen des Kreuzbandes sind diese Werte ähnlich, mit 59% Begleitverletzungen in einer rezenten Studie [11].

## Therapie

Die Therapie der VKB-Ruptur, egal ob konservativ oder operativ, zielt mittelfristig auf den Rückgewinn bzw. den Erhalt der Kniestabilität, und langfristig auf das Vermeiden von sekundären Problemen wie Meniskusrupturen, Knorpelschäden und schliesslich Arthrose hin. Objektive und wissenschaftlich fundierte Entscheidungsparameter pro oder contra Operation, respektive konservativer Therapie, sind die Stabilität des Gelenks, der Anspruch an das Gelenk und Begleitverletzungen. Ein stabiles Knie ohne Begleitverletzungen und mit normalem sportlichen Anspruch eignet sich für eine konservative Therapie. Ein instabiles Gelenk, oder ein solches mit behandlungsbedürftigen Begleitverletzungen, ist eine Indikation zu einer operativen Stabilisierung. Leider wird die Entscheidung zur Therapieform aber immer noch vor allem durch das Alter des Patienten geprägt, obwohl natürlich Instabilität, Meniskusrisse und Knorpelschäden dem Knie altersunabhängig schaden.

### *Konservative Therapie*

Die konservative Therapie der VKB-Ruptur zielt auf muskuläre Stabilisierung und Vermeidung von Risikoverhalten ab. Studien aus dem Erwachsenenalter haben gezeigt, dass bis zu 40% der Patienten mit einer konservativen Therapie das Auslangen finden [12]. Im Kindes- und Jugendalter liegt die Situation anders. Erstens zeigen kindliche Gelenke eine vermehrte Laxizität, was die muskuläre Stabilisierung schwierig macht. Zweitens sind Sportverbote, oder ähnliche Verhaltensanpassungen, bei Kindern nur sehr schwer durchzusetzen. Eine Meta-Analyse aus 2011 fasst die Ergebnisse von 47 Studien zur Behandlung der VKB-Ruptur bei Kindern zusammen [5]. Die konservative Behandlung zeigte durch die Bank schlechtere Ergebnisse, im Sinne von anhaltenden Beschwerden und Sekundärverletzungen. Es gibt in der Literatur lediglich eine (kontrollierte) Studie, die Erfolge mit konservativer Therapie bei Jugendlichen mit VKB-Ruptur zeigte [13]. Aber selbst dieser Autor betont in der Diskussion ausführlich, dass diese Gruppe lediglich über einen kurzen Zeitraum (bis zur skeletalen Reife) konservativ behandelt und strengstens überwacht wurde, bevor ein VKB-Ersatz durchgeführt wurde. Chronologisch passend zum Anstieg in der Inzidenz von

kindlichen VKB-Rupturen, zeigen sich nun mehr und mehr Berichte über therapiebedürftige Sekundärschäden. Lawrence et al. beschrieben einen signifikanten Anstieg irreparabler Knorpel- und Meniskussschäden in instabilen Knien nur 12 Wochen nach Ruptur [14]. Ein rezentes Paper analysiert Technik und Ergebnisse, wenn diese Patienten eine Meniskus-Allograft-Transplantation brauchen [15].

Auch wenn dies in Summe pessimistisch klingt, heisst das nicht, dass die konservative Therapie im Kindes- und Jugendalter unmöglich ist. Speziell Partialrupturen profitieren von einer konservativen Therapie, wobei Rupturen <50%, Rupturen des anteromedialen Bündels und jüngere Patienten bessere Heilungschancen haben [16]. Es sollte aber streng darauf geachtet werden, dass wichtige Schwellen in der Therapie zeitgerecht erreicht werden. Diese sind aus der postoperativen Rehabilitation gut dokumentiert und können für die konservative Therapie gleichermaßen benutzt werden [17]. Eine Quadriceps-Hamstring-Ratio von >0.6 hat sich ebenso als Schutzfaktor für Kreuzband-RE-Rupturen gezeigt.

### *Operative Therapie – konventioneller Bandersatz*

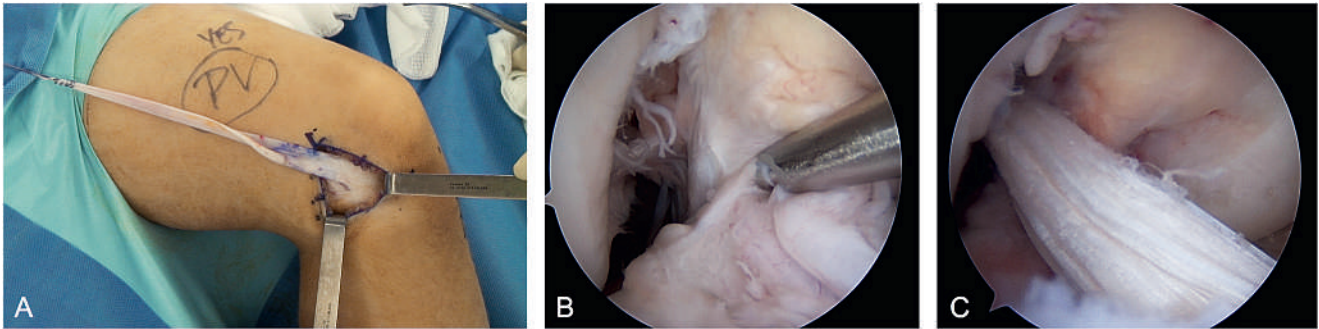
Die allgemeine Sorge beim konventionellen VKB-Ersatz beim Kind und Jugendlichen ist eine Schädigung der Wachstumsfuge, und damit des Wachstums, durch die Tunnel in Tibia und Femur. Nichtsdestotrotz wird und wurde die klassische VKB-Plastik bei Jugendlichen nahe dem Wachstumsabschluss angewandt. Gebhard et al. verglichen 4 Graft-Typen (Hamstring, Patellarsehne, Fascia Lata, Quadricepssehne), fanden aber keine Evidenz für einen Vorteil eines bestimmten Grafts [18]. Die Herodicus-Gruppe untersuchte postoperative Komplikationen und fand unter knapp 500 Patienten 3 Achsabweichungen und 2 Beinlängendifferenzen > 10 mm, was einem Risiko von 1% entspricht [19]. Eine Meta-Analyse von 935 Patienten mit einem mittleren Alter von 13 Jahren zeigte ein etwas höheres Risiko von Wachstumsfugenverletzungen von 1.8%–2% [20]. Was das klinische Outcome betrifft, so kann die Kniefunktion in 85% der Fälle komplett normalisiert werden (IKDC A und B), und Lysholm und OAK Scores von 95–98 Punkten werden erreicht [5,20]. Rerupturraten sind in dieser exponierten Gruppe relativ hoch und erreichen in einzelnen Studien bis zu 25% in langfristigen Analysen (>5 Jahre) [2].

### *Operative Therapie – Bandersatz bei offenen Wachstumsfugen*

Bei offenen Wachstumsfugen und verbleibendem Wachstum ist das Bohren von Tunneln durch die Epiphysenfuge problematisch. Daraus könnten Wachstumsstörungen im Sinne von Beinlängenunterschied oder Achsfehlern entstehen, wofür das Risiko knapp 2% ist [19,21,22]. Für diese Patienten gibt es verschiedene Techniken, die trotzdem einen Kreuzbandersatz erlauben.

Die am besten erforscht und dokumentierte Technik ist die extra- und intra-artikuläre, extra-ossäre Stabilisierung des Knie mit einem Tractus iliotibialis Streifen nach Micheli [23]. Dabei wird ein distal gestielter Tractus-Streifen um den lateralen Kondylus geführt, durch die Notch gezogen und medial der Tuberositas tibiae mit dem Periost vernäht (Abb. 2). Diese Technik bedarf keiner Tunnel oder knöcherner Eingriffe und schon die Wachstumsfuge. Ursprünglich als





**Abbildung 2:** Ein junger Fussballer mit offenen Wachstumsfugen (9 Jahre alt) hat eine VKB-Ruptur beim Skifahren erlitten. Er hatte regelmässige giving-way-Attacken und dadurch zwei weitere «mittelgrosse Unfälle», bei denen es schliesslich auch zu einer Ruptur des Aussenmeniskus kam. Die Knieinstabilität und der Meniskusriss provozierten die Entscheidung zur Operation. Hierfür wurde ein distal gestielter Streifen des Tractus iliotibialis präpariert (A). Die Notch zeigt in der ASK das komplette Fehlen des VKB (B). Hier wird der Streifen durchgeführt (C) und distal an der Tibia mit dem Periost vernäht. Korrekt durchgeführt hat diese Technik wenig Komplikationen und ein exzellentes klinisches Ergebnis.

Überbrückung bis zur skeletalen Reife entwickelt, zeigte sich der Ergriff als so erfolgreich, dass er heute als definitive Behandlung gilt [5]. Lysholm Scores sind nach 4 Jahren stabil mit 97.4 Punkten [23]. Biomechanisch besteht kein Unterschied zur konventionellen VKB-Plastik [24].

Andere Techniken zielen auf Tunnelplatzierung parallel zu den Wachstumsfugen, in einer theoretischen «safe zone» ab [25]. Eine Analyse der Ergebnisse dieser «all-epiphyseal» VKB-Ersatztechnik zeigte aber eine deutliche Gefahr einer tangentialen Verletzung oder indirekten thermischen Schädigung der Wachstumsfuge durch solche Operationstechniken [5].

#### *Operative Therapie – die Allerjüngsten (Tanner I & II)*

Auch für die allerjüngsten Patienten, mit Tanner-Stadien I und II, oder einem chronologischen Alter von weniger als 12 Jahren, gibt es gute Daten zur Behandlung von VKB-Rupturen. Streich et al. verglichen 12 konservativ behandelte mit 16 operativ behandelten Patienten mit einem medianen Alter von 11 Jahren [26]. Die operative Gruppe hatte nach 70 Monaten signifikant bessere klinische Ergebnisse, und 60% der konservativen Patienten mussten wegen anhaltender Instabilität und/oder sekundärer Schäden binnen 2 Jahren eine VKB-Plastik vornehmen. Es gab in der operativen Gruppe trotz konventionellen Knochentunneln keine Wachstumsstörungen. Liddle et al. und Bollen et al. zeigen ähnliche Ergebnisse mit Knochentunnel-basierter VKB-Plastik, wenn auch bei Liddle einer von 17 Patienten einen 5°-Valgus entwickelte [27,28]. Die oben erwähnte extra-ossäre Technik zeigte exzellente Ergebnisse und keine Wachstumsstörungen in bis dato über 800 Patienten.

#### *Operative Therapie – Bandregeneration*

Die neueste Entwicklung auf dem Gebiet der VKB-Behandlung sind regenerative Therapien [29]. Gerade für Kinder und Jugendliche sind diese interessant, solange nicht grosse Flurschäden durch Implantate produziert werden. Eine Technik, die in den prä-klinischen Studien die gleichen Ergebnisse wie eine Patellarsehnen-VKB-Plastik zeigte, und sogar die strengen Prüfungen der FDA bis dato bestanden hat, ist der soge-

nannte Bridge-Enhanced ACL Repair (BEAR) [30,31]. Diese Technik besteht aus einer direkten Naht des VKB, unterstützt durch ein Kollagenbiomaterial und Eigenblut des Patienten. Sämtliche Aspekte sind resorbierbar und/oder autolog. Am Children's Hospital Boston, einem Lehrspital der Harvard Medical School, wurde eine Kohorte von 100 Patienten behandelt – und das ohne Revision oder Komplikationen in der mid-term-Untersuchung.

Kurzfristig populär, aber in letzter Zeit etwas weniger prominent, ist die «healing response» nach Steadman. Hier handelt es sich um eine Microfracture des VKB-Ansatzes im Falle eines proximalen Aus- statt zentralen Durchrisses des VKB. Diese Verletzung ist relativ selten, aber Steadman et al. fanden eine relativ gute biologische Antwort, sprich Vernarbung des VKB, in ausgesuchten Fällen [32].

#### **Aussicht in die Zukunft**

Die Aussicht in, und die Wünsche für, die Zukunft der kindlichen und jugendlichen Kreuzbandverletzungen sind eigentlich sehr realistisch. Die Behandlungsoptionen sind gut definiert und mit Evidenz unterlegt. Verbesserungspotenzial für die Behandlung betroffener Patienten liegt vor allem in 2 Punkten.

So ist die Kreuzbandruptur des Kindes und Jugendlichen immer noch eine unterschätzte Entität, sowohl was Vorkommen als auch Behandlungsbedarf betrifft. Ein Trauma, mit oder ohne Fremdkontakt, mit einer sofortigen Knieschwellung oder einem Hämarthros sollte nicht nur bei Erwachsenen an eine Kreuzbandruptur denken lassen (einschlägige Studien geben eine 52%-Wahrscheinlichkeit einer VKB-Ruptur bei traumatischem Hämarthros an) [33,34]. Während die konservative Therapie sowohl eine geeignete initiale wie auch definitive Therapie sein kann, muss ein Patient mit regelmässigen Giving-way-Attacken als Therapieversager mit einem hohen Risiko irreparabler Sekundärschäden an Knorpel und Meniskus angesehen werden. Hier sollte eine operative Stabilisierung zeitnah und in altersgerechter Technik durchgeführt werden.

Was zum zweiten Punkt führt. Angesichts der Kontroversen rund um Diagnose und Behandlung, wird die Bedeutung von Präventionsmassnahmen für VKB-Rupturen bei Kindern und Jugendlichen schnell offensichtlich. Es gibt gute

Daten zu Präventionsprogrammen, die sowohl durch ihre hohe Effektivität als auch einfache Durchführbarkeit bestehen. Leider sind diese Programme nicht weit verbreitet. Ein strukturierter Ansatz hier wäre die einfachste und kosteneffektivste Lösung von VKB-Rupturen des Kindes- und Jugendalters.

## Korrespondenzadresse

PD Dr. P. Vavken  
alphaclinic Zürich  
Kraftstrasse 29  
8044 Zürich  
Tel. +41 44 388 84 11  
Fax +41 44 388 84 21  
vavken@alphaclinic.ch

## Referenzen

1. Wright R, Spindler K, Huston L. Revision ACL reconstruction outcomes: MOON cohort. *J Knee Surg.* 2011;24(4):289-94.
2. The MARS Group, Wright RW, Huston LJ, Spindler KP, Dunn WR, Haas AK, et al. Descriptive Epidemiology of the Multicenter ACL Revision Study (MARS) Cohort. *Am J Sports Med.* 2010 Oct 1;38(10):1979-86.
3. Granan L-P, Bahr R, Steindal K, Furnes O, Engebretsen L. Development of a National Cruciate Ligament Surgery Registry. *Am J Sports Med.* ; 2008;36(2):308-15.
4. Røtterud JH, Sivertsen EA, Forssblad M, Engebretsen L, Årøen A. Effect of Gender and Sports on the Risk of Full-Thickness Articular Cartilage Lesions in Anterior Cruciate Ligament-Injured Knees. *Am J Sports Med.* ; 2011;39(7):1387-94.
5. Vavken P, Murray M. Treating Anterior Cruciate Ligament Tears in Skeletally Immature Patients. *ARTHROSCOPY.* 2011 Apr 11;27(5):704-16.
6. Barenus B, Ponzer S, Shalabi A, Bujak R, Norlén L, Eriksson K. Increased Risk of Osteoarthritis After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine.* ; 2014;42(5):1049-57.
7. Sadoghi P, Keudell von A, Vavken P. Effectiveness of Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Training Programs. *J Bone Joint Surg Am.* 2012 Mar 27;94(9):769-76.
8. Sitler M, Ryan J, Hopkinson W, Wheeler J, Santomier J, Kolb R, et al. The efficacy of a prophylactic knee brace to reduce knee injuries in football: a prospective, randomized study at West Point. *Am J Sports Med.* 1990 May;18(3):310-5.
9. Vavken P, Tepolt F, Kocher MS. Concurrent Meniscal and Chondral Injuries in Pediatric and Adolescent Patients Undergoing ACL Reconstruction. *J Pediatr Orthop.* 2016 May 1.
10. Dumont GD, Hogue GD, Padalecki JR, Okoro N, Wilson PL. Meniscal and Chondral Injuries Associated With Pediatric Anterior Cruciate Ligament Tears: Relationship of Treatment Time and Patient-Specific Factors. *Am J Sports Med.* 2012 Aug 31;40(9):2128-33.
11. Mitchell J, Sjoström R. Incidence of meniscal injury and chondral pathology in anterior tibial spine fractures of children. *J Pediatr Orthop.* 2015;35(2):130-5.
12. Frobell R, Roos H, Roos E, Roemer F, Ranstam J, Lohmander L. Treatment for acute anterior cruciate ligament tear: five year outcome of randomised trial. *British Journal of Surgery.* 2013;49(10):700.
13. Woods GW, O'Connor DP. Delayed anterior cruciate ligament reconstruction in adolescents with open physes. *Am J Sports Med.* 2004;32(1):201-10.
14. Lawrence J, Argawal N, Ganley TJ. Degeneration of the Knee Joint in Skeletally Immature Patients With a Diagnosis of an Anterior Cruciate Ligament Tear. *Am J Sports Med.* ; 2011;39(12):2582-7.
15. Kocher MS, Tepolt FA, Vavken P. Meniscus transplantation in skeletally immature patients : *Journal of Pediatric Orthopaedics B.* 2016 Jul;25(4):343-8.
16. Kocher M, Micheli L, D Zurakowski, Luke A. Partial tears of the anterior cruciate ligament in children and adolescents. *Am J Sports Med.* 2002 Sep 1;30(5):697-703.
17. Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, Miladi R, Witvrouw E. Likelihood of ACL graft rupture: not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *British Journal of Surgery.* 2016;50(15):946-51.
18. Gebhard F, Ellermann A, Hoffmann F, Jaeger J-H, Friederich NF. Multicenter-study of operative treatment of intraligamentous tears of the anterior cruciate ligament in children and adolescents. *Knee Surg Sports Traumatol Arthr.* 2006 Sep 21;14(9):797-803.
19. Kocher M, Saxon H, Hovis W, Hawkins R. Management and complications of anterior cruciate ligament injuries in skeletally immature patients: survey of the Herodicus Society and The ACL Study Group. *J Pediatr Orthop.* 2002 Jul 1;22(4):452-7.
20. Frosch KH, Stengel D, Brodhun T, Stietencron I, Holsten D, Jung C, et al. Outcomes and Risks of Operative Treatment of Rupture of the Anterior Cruciate Ligament in Children and Adolescents. *ARTHROSCOPY.* 2011 Jun 3;26(11):1539-50.
21. Kocher M, Smith J, Zoric B, Lee B, Micheli L. Transphyseal anterior cruciate ligament reconstruction in skeletally immature pubescent adolescents. *JBJS.* 2007 Dec 1;89(12):2632-9.
22. Calvo R, Figueroa D, Gili F, Vaisman A, Mocoçain P, Espinosa M, et al. Transphyseal Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Patients With Open Physes. *Am J Sports Med.* ; 2015;43(2):289-94.
23. Kocher M, Garg S, Micheli L. Physeal sparing reconstruction of the anterior cruciate ligament in skeletally immature prepubescent children and adolescents. *Surgical technique. JBJS.* 2006 Sep 1;88 Suppl 1 Pt 2:283-93.
24. Kocher M, Garg S, Micheli L. Physeal sparing reconstruction of the anterior cruciate ligament in skeletally immature prepubescent children and adolescents. *JBJS.* 2005 Nov 1;87(11):2371-9.
25. Anderson A. Transepiphyseal replacement of the anterior cruciate ligament in skeletally immature patients. A preliminary report. *JBJS.* 2003 Jul 1;85-A(7):1255-63.
26. Streich NA, Barié A, Gotterbarm T, Keil M, Schmitt H. Transphyseal reconstruction of the anterior cruciate ligament in prepubescent athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthr.* 2010 Feb 4;18(11):1481-6.
27. Liddle A, Imbuldeniya A, Hunt D. Transphyseal reconstruction of the anterior cruciate ligament in prepubescent children. *JBJS Br.* 2008 Oct 1;90(10):1317-22.
28. Bollen S, Pease F, Ehrenraich A, Church S, Skinner J, Williams A. Changes in the four-strand hamstring graft in anterior cruciate ligament reconstruction in the skeletally-immature knee. *JBJS Br.* 2008 Apr 1;90(4):455-9.
29. Vavken P, Murray MM. Translational studies in anterior cruciate ligament repair. *Tissue Eng Part B Rev.* 2009.
30. Vavken P, Fleming BC, Mastrangelo AN, Machan JT, Murray MM. Biomechanical Outcomes After Bioenhanced Anterior Cruciate Ligament Repair and Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Are Equal in a Porcine Model. *ARTHROSCOPY.* 2012 Jan 19;:1-9.
31. Vavken P, Murray MM. The potential for primary repair of the ACL. *Sports medicine and arthroscopy review.* 2011 Mar 1;19(1):44-9.
32. Steadman J, Cameron-Donaldson M, Briggs K, Rodkey W. A minimally invasive technique ("healing response") to treat proximal ACL injuries in skeletally immature athletes. *J Knee Surg.* 2006;19(1):8-13.
33. Askenberger M, Ekström W, Finnbogason T, Janarv P-M. Occult Intra-articular Knee Injuries in Children With Hemarthrosis. *Am J Sports Med.* ; 2014;42(7):1600-6.
34. Olsson O, Isacson A, Englund M, Frobell RB. Epidemiology of intra- and peri-articular structural injuries in traumatic knee joint hemarthrosis – data from 1145 consecutive knees with subacute MRI. *Osteoarthritis and Cartilage.* 2016 Nov;24(11):1890-7.