



Zusammenfassung

Die Anfänge der Kreuzbandchirurgie stellte die Naht über eine invasive Arthrotomie dar, was jedoch aufgrund einer hohen Komplikations- und Re-Rupturrate alsbald wieder verlassen wurde. Heutzutage ist der operative Goldstandard die arthroskopische VKB Rekonstruktion mittels autologem Sehnenmaterial. Diese Technik liefert reproduzierbare gute Resultate, ist jedoch auch mit einer Grafterntnahme-Morbidität, vorderen Knieschmerzen und postoperativer Quadrizepsschwäche assoziiert. Die neuesten technischen Entwicklungen im Bereich der arthroskopischen Chirurgie haben daher das Interesse an der VKB Naht wiederbelebt. So wurden für die Naht und Augmentation mittels InternalBrace™ gute klinische Ergebnisse beschrieben, jedoch bleibt die Literatur bislang noch den Beweis des funktionell-biomechanischen Vorteils dieser Technik schuldig.

Schlüsselwörter

VKB-Naht– InternalBrace– Biomechanik– VKB-Rupturen

S. Müller et al.

Surgical therapy of anterior cruciate ligament injuries: reconstruction or primary repair and InternalBrace™ augmentation?– a narrative review

Summary

While the beginnings of Anterior Cruciate Ligament (ACL) surgery comprised the direct suture of the torn ligament via an invasive arthrotomy, this approach has been swiftly abandoned because of high complication and re-rupture rates. Today, the gold standard is arthroscopic ACL reconstruction using autologous tendon material. However, although this technique results in reproduceable good outcomes, several postoperative complications such as graft harvesting site morbidity, anterior knee pain and quadriceps weakness have been reported.

REVIEW / SPECIAL ISSUE

Die operative Therapie der vorderen Kreuzbandruptur: Rekonstruktion oder primäre Naht und InternalBrace™ Augmentation? – ein narratives Review

Sebastian Müller^{a,b,c}, Linda Bühl^{a,b,c}, Birte Coppers^{a,b,c}, Corina Nüesch^{a,b,c,d}, Annegret Mündermann^{a,b,c,d}, Christian Egloff^{a,b,c}

^aKlinik für Orthopädie und Traumatologie, Universitätsspital Basel, Spitalstrasse 21, 4031, Basel, Schweiz

^bDepartment of Biomedical Engineering, University of Basel, Allschwil, Schweiz

^cDepartment of Clinical Research, University of Basel, Schweiz

^dSpinale Chirurgie, Universitätsspital Basel, Schweiz

Eingegangen/submitted: 30.11.2020; überarbeitet/revi- sed: 22.01.2021; akzeptiert/accepted: 25.01.2021

Online verfügbar seit/Available online: 21.01.2021

Einleitung

Die Verletzung des vorderen Kreuzbandes (VKB) ist eine der häufigsten Verletzungen des Kniegelenkes und kann zu Schmerzen, Instabilität sowie signifikanten Einschränkungen des täglichen Lebens führen [27]. Eine isolierte VKB-Ruptur kann dabei prinzipiell konservativ behandelt werden: In ihrer im New England Journal of Medicine veröffentlichten Studie zeigten Frobell et al., dass Patienten nach konservativer Therapie 2 Jahre nach Trauma gleich gute Resultate im KOOS Score aufwiesen wie nach VKB-Rekonstruktion [13]. Entsprechend wurde postuliert, dass man Patienten, die willens seien, ihr Aktivitätsniveau anzupassen, primär konservativ behandeln könne [37]. Auf der anderen Seite liefert die Literatur reichlich Evidenz, dass eine chronische VKB-Insuffizienz

mit einem signifikant erhöhtem Risiko für sekundäre Meniskus- und Knorpelschädigungen nach 6 bzw. 12 Monaten assoziiert ist, wie unter anderem unlängst von Mehl und Petersen in ihrem systematischen Review beschrieben [31]. Ursächlich für diese sekundären Schädigungen könnte der deutlich erhöhte tibiofemorale Druck insbesondere im posterioren Kompartiment des VKB defizienten Kniegelenkes sein [20]. Entsprechend fanden Sanders et al. in ihrer Studie bei 364 Patienten nach konservativer Therapie ein signifikant erhöhtes Risiko für eine sekundäre Arthrose sowie die Notwendigkeit einer Knie-Totalprothese [41]. Khan et al. schlussfolgerten, dass körperlich aktive Patienten von einer chirurgischen Behandlung profitieren, da dadurch eine signifikant bessere Stabilität sowie bessere klinische Ergebnisse erreicht werden

Recent technical developments in arthroscopic surgery have therefore resurrected the interest in primary ACL repair. While good clinical outcomes after primary ACL repair and InternalBrace™ augmentation have been reported, supporting evidence for the functional benefit of this technique is still missing.

Keywords

ACL repair – InternalBrace – Biomechanics – ACL ruptures

könnten [24]. Zu einem ähnlichen Schluss kommen Krause und Frosch in ihrem systematischen Review, in dem eine Versagensrate der konservativen Therapie von 17.5% sowie ein besseres funktionelles Outcome nach VKB-Rekonstruktion konstatiert wird [26].

Die Anfänge der Kreuzbandchirurgie reichen dabei bis ins späte 19. Jahrhundert zurück [39]. Basierend auf den Arbeiten von O'Donoghue und Rockwood [38] rückte insbesondere die Naht des VKB's in den Fokus des Interesses, so dass die direkte Naht des VKB's mittels invasiver Arthrotomie seit den späten 1970er und frühen 1980er Jahren zum Goldstandard in der Kreuzbandchirurgie avancierte [39]. Die Resultate dieses Verfahrens erwiesen sich jedoch als höchst variabel und nicht zufriedenstellend: So wurden postoperativ signifikante Einschränkungen des Bewegungsumfanges ebenso wie eine persistierende Instabilität und eine Re-Ruptur-Rate von bis zu 50% beschrieben [12]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Taylor und Feagin [45]: In ihrem Langzeit Follow-up mehr als 30 Jahre nach offener VKB-Naht bezeichneten nur ca. 50% (18/34) der Patienten ihr Kniegelenk als „normal“ oder „fast normal“. Potentielle Gründe für die wenig überzeugenden Outcomes wurden in der invasiven Arthrotomie, einer schlechten Patientenselektion sowie den sehr restriktiven Nachbehandlungsschemata mit längerfristiger Immobilisation des Beines gesehen [12].

Nicht zuletzt zeigten Hefti et al. 1991 in ihrer Tierversuchsstudie, dass vollständige Rupturen des VKB's wohl ein Regeneratgewebe bilden, jedoch keine ausreichende Heilung und suffiziente Stabilität aufweisen würden [17]. Aus besagten Gründen wurde die offene Naht des VKB's in den frühen 90er Jahren wieder verlassen und Alternativen zur

Verbesserung der Kniegelenksstabilität erforscht.

Mitte der 1990er Jahre und vor allem durch die Entwicklung der Arthroskopie setzte letztlich der Siegeszug der minimal invasiven Operationsverfahren und der VKB-Ersatzplastiken mit autologem Sehnenmaterial ein, der bis heute anhält. Die Überlegenheit der Rekonstruktion im Hinblick auf bessere klinisch-funktionelle Resultate und geringere Re-Rupturaten im Vergleich zu den älteren Techniken konnte dabei in mehreren randomisiert-kontrollierten Studien nachgewiesen werden [9,15]. Entsprechend ist die arthroskopische VKB-Rekonstruktion mittels autologem (seltener allogem) Sehnenmaterial (Hamstring-, Quadriceps- oder Patellarsehne) zur Goldstandard Operation avanciert, die reliable und reproduzierbar gute Resultate liefert. So beschrieb Sanders eine Graft Überlebensrate von 91% 25 Jahre nach VKB-Rekonstruktion in einer Kohorte mit 1355 Patienten [40]. Ebenso wurde eine Rückkehr zum präoperativen Sportniveau in 90% bei Spitzensportlern und immerhin in 65% bei Hobbyathleten 12 Monate nach VKB-Rekonstruktion beschrieben [53].

Dennoch finden sich in der Literatur auch zahlreiche Belege für Komplikationen nach VKB-Rekonstruktion: So fanden sich nach VKB-Plastik mit Patellasehnengraft in 13.4% der Operierten ein persistierendes Extensionsdefizit $> 5^\circ$ und 33.6% der Patienten klagten über einen moderaten bis ausgeprägten vorderen Knieschmerz 2-5 Jahre postoperativ [23].

Nach VKB-Rekonstruktion mit Hamstringsehnen konnten Gokeler et al. 2012 signifikante propriozeptive Defizite nachweisen [14], ferner wurden eine verminderte Flexionskraft und tibiale Rotation nach dieser Operation beschrieben [36]. Einer Metaanalyse von Biau et al.

zufolge erreichen lediglich 4 von 10 Patienten nach einer VKB-Rekonstruktion wieder "normale" Werte gemessen an klinischen Scores, was möglicherweise durch den Verlust der propriozeptiven Eigenschaften des nativen VKBs begründet sein könnte [5]. Darüber hinaus stellt vor allem auch die postoperative Quadrizepschwäche, welche nach VKB-Rekonstruktion eine häufige Erscheinung ist, einen signifikanten Risikofaktor für die Entstehung einer Kniegelenksarthrose dar [44].

Moderne Entwicklungen

In den vergangenen Jahren entwickelte sich die Kreuzbandchirurgie rasant: Immer neue Erkenntnisse – wie etwa optimale Tunnelplatzierungen, Fertigkeiten und Techniken (Platzierung des femoralen Tunnels über das mediale Portal und nicht mehr transtibial) – wurden veröffentlicht [21]. Auf der anderen Seite entwickelten sich aber auch arthroskopische Techniken mit einer rapiden Geschwindigkeit: Immer neuere und bessere Hilfsmittel wie Fadenanker, selbst-resorbierbare Pins und Nahtmaterialien wurden verfügbar. Diese technischen Entwicklungen trugen dazu bei, dass das Interesse an einer Reparatur bzw. primären Naht des VKB's wiedererweckt wurde – gerade auch, um die oben genannten Komplikationen vermeiden zu können. So rücken neuerdings auch wieder biologische Verfahren und die primäre Reparatur, bei der das native Ligament erhalten wird, vermehrt in den Vordergrund. Mackay et al. führte ein zusätzlich zur Naht verstärkendes Brace ein, welches die Einheilung des Ligamentes stimulieren und schützen und somit die historisch hohen Re-Rupturraten vermeiden soll [28]. Als explizite Vorteile der primären VKB-Naht mit Verstärkung im Ver-

gleich zur VKB-Rekonstruktion mittels Auto- oder Allograft werden beispielsweise eine signifikant kürzere OP Dauer, ein minimal-invasiver Zugang mit kleineren Bohrtunneln (beim InternalBrace™), das Wegfallen der Graft-Entnahme-Morbidität und, falls erforderlich, eine weniger komplizierte Revisions-Operation beschrieben [46]. Durch den Erhalt des nativen VKB's mit dessen Nervenendigungen und Blutversorgung wird der Erhalt der Propriozeption, eine schnellere postoperative Rehabilitation, geringere postoperative Muskelkraftdefizite sowie eine frühere Rückkehr zu Arbeit und Sport im Vergleich zur VKB-Rekonstruktion postuliert [2], wenngleich auch bis heute keine hinlängliche Evidenz dazu vorliegt.

Das Konzept der dynamischen intraligamentären Stabilisierung des rupturierten VKB's (Ligamys™, Mathys AG, Bettlach, Schweiz) wurde 2014 erstmals von Eggli und Kohl vorgestellt [25]. Während die anfänglichen Ergebnisse vielversprechend waren, wurde in den folgenden Jahren über hohe Komplikationsraten berichtet [3]. So berichteten Häberli et al. [16] nach durchschnittlich 21 Monaten über eine Reinterventionsrate von 48.2% und Evangelopoulos und Kohl [11] über eine Komplikationsrate von 78.8% bei mid-substance Rupturen, sofern diese nicht zusätzlich mit einer Kollagenmembran versorgt wurden. Erst kürzlich berichteten Ahmad et al. über eine 5-Jahres Overall Survival Rate von 70%, welche auf 56% sank bei Patienten, die vor der Verletzung Leistungssport betrieben hatten [4].

Einen innovativen experimentellen Ansatz zur Verbesserung des Heilungserfolges der wie beschrieben schwer zu therapierenden „Mid-substance tears“ verfolgt die Gruppe von Martha Murray aus Boston. Neben der Naht des gerissenen VKB's wird hier ein mit Patientenblut getränk-

ter Schwamm aus boviner extrazellulärer Matrix quasi schützend über die Naht gestülpt, was als Bridge-Enhanced Anterior cruciate ligament Repair (BEAR) bezeichnet wird [34]. Die ersten zehn mit dieser Technik behandelten Patienten wiesen 24 Monate postoperativ kein Nahtversagen und vergleichbare bzw. mitunter sogar bessere klinische Resultate und Stabilitätswerte in der AP-Translation auf wie das mit VKB-Rekonstruktion behandelte Vergleichskollektiv. Ebenfalls zeigte sich ein vergleichbares funktionelles Ergebnis (Sprungtests) sowie eine signifikant bessere Hamstring Muskelkraft in der BEAR-Gruppe [35]. Die erst kürzlich publizierten 2-Jahres-Resultate bei einem sehr jungen Patientenkollektiv (medianes Alter 17 Jahre) bestätigen die vielversprechenden Zwischenresultate dieses Verfahrens [34].

Eine mittlerweile häufig verwendete und etablierte Methodik im Bereich der VKB-Naht und Augmentation ist das InternalBrace™ (Arthrex Inc., Naples, FL, USA, vgl. Abb. 1). Dabei wird in einem Zeitfenster von 2-3 Wochen nach Erleiden einer proximalen VKB-Ruptur (Klassifikation nach Sherman: Grade I und II) der VKB-Stumpf zunächst proximal mittels zweier Nähte (z.B. FiberLink™, Arthrex, Naples, FL, USA) ange-schlungen (Abb. 2a). Unter Zuhilfenahme konventioneller Zielgeräte werden anschließend 4.5 mm Bohrlöcher im Bereich des tibialen sowie femoralen Footprints angelegt und die beiden VKB-Nahtfäden transfemorale ausgeleitet, wodurch sich das native VKB wieder an seinen femoralen Footprint anlegt. Über einen transtibialen Shuttlefaden wird ein FiberTape™, also das InternalBrace™, zur Verstärkung auf das native VKB aufgebracht (Abb. 2b). Proximal erfolgt die Fixierung mit einem Flip Button (z.B. Rigidloop™, DePuy Synthes, Mitek Sports Medicine,

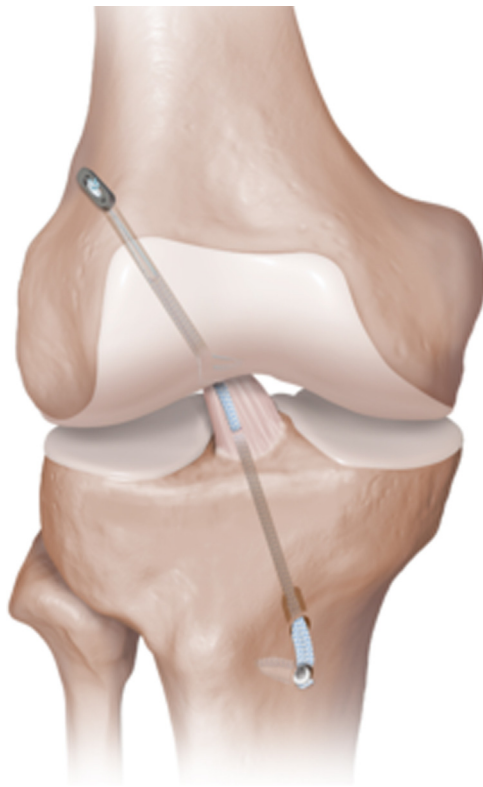


Abbildung 1
Schematische Darstellung der VKB-Naht und InternalBrace™ Augmentation (Bild mit freundlicher Genehmigung von Arthrex GmbH).

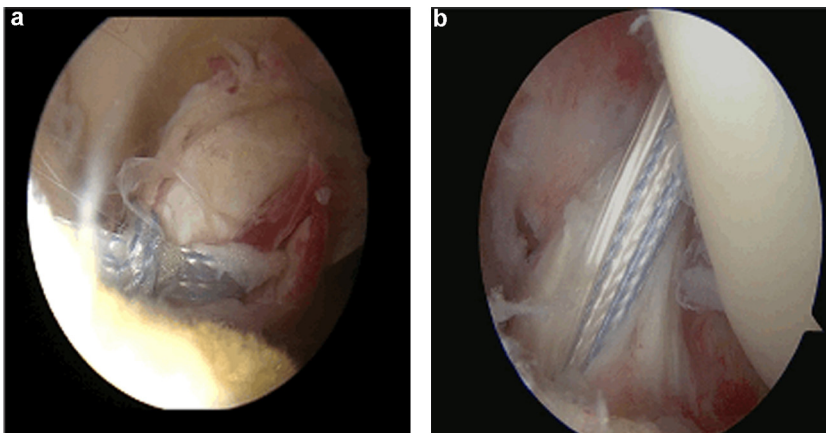


Abbildung 2
Intraoperative Darstellung. a) Naht des VKB. b) Augmentation mittels InternalBrace™.

Raynham, MA, USA), mit dem die Fäden der VKB-Naht fest vernäht werden, distal an der Tibia z.B. über einen EndoTack® (Karl Storz

SE und Co. KG, Tuttlingen, Deutschland) Button. In biomechanischen Kadaverstudien konnte gezeigt werden, dass die

Ausreißkraft einer VKB-Naht durch das InternalBrace™ signifikant von 279N auf 693N gesteigert werden konnte und somit eine stabile Schienung des nativen Ligamentes gewährleistet wird [29].

Seit Mai 2016 behandeln wir Patienten mit proximalen Rupturen des VKB an unserer Klinik mit dieser Technik. Unsere eigenen guten klinischen Ergebnisse [7,33] werden auch durch die Literatur bestätigt: Heusdens et al. berichteten 2 Jahre postoperativ über eine stabile Kniefunktion und gute klinische Outcomes, allerdings bei einer Re-Rupturrate von 11% [18]. Es muss jedoch erwähnt werden, dass diese Patienten bis zu 12 Wochen nach Trauma operiert wurden und auch mid-substance Rupturen ins Kollektiv eingeschlossen wurden.

Mattiassich et al. berichteten über vergleichbare klinische und radiologische Resultate 12-18 Monate nach InternalBrace™ Augmentation im Vergleich zur Rekonstruktion mittels autologer Semitendinosussehne [30]. Die Frage, wer der ideale Patient für diese Operationsmethode wäre, versuchten van der List et al. in ihrer 2019 erschienenen Arbeit zu beantworten: Demzufolge könnten erfolgversprechende klinische Ergebnisse erzielt werden bei älteren Patienten, Patienten mit niedrigerem BMI und wenn die Operation innerhalb von 4 Wochen nach Verletzung durchgeführt wird [49]. Auch die Lokalisation der VKB-Ruptur spielt bei einer erfolgreichen Naht eine wichtige Rolle: während nach proximalen Rupturen gute Ergebnisse erzielt werden können, sind mid-substance und distal gelegene Rupturen häufig mit schlechteren Resultaten assoziiert [48].

Trotz der vielversprechenden klinischen Ergebnisse bleibt die Literatur bis zum jetzigen Zeitpunkt den Beweis des biomechanisch-funktionellen Vorteils dieser Technik

schuldig. Während zahlreiche biomechanische Untersuchungen nach VKB-Rekonstruktion durchgeführt wurden [14,36,44] und auch bereits Ganganalysen und Sprungtests nach dynamischer intraligamentärer Stabilisierung publiziert wurden [6,43], fehlen diese bislang vollständig für die primäre VKB-Naht und InternalBrace™ Augmentation. Bis heute wurden über diese Technik nur vereinzelte Reviews und Case-Control-Studien mit geringen Patientenzahlen veröffentlicht [1,22,47,50]. Die detaillierte Kenntnis der dynamischen Kniebiomechanik nach Versorgung der VKB-Ruptur ist jedoch kritisch, da z.B. bei Patienten nach VKB-Rekonstruktion eine Außenrotationsfehlstellung der Tibia relativ zum Femur beim Gehen beobachtet wurde [42], die aufgrund von postoperativ erhöhter Druckbelastung des Knorpels als Pathomechanismus eines erhöhten Risikos einer sekundären Arthrose identifiziert wurde [10]. Auch ist bekannt, dass der Erfolg einer VKB-Rekonstruktion sowohl von der mechanischen als auch der neuromuskulären Stabilität abhängig ist, wobei letztere mit einer intakten Propriozeption assoziiert ist [52]. Jedoch ist auch beschrieben, dass die Propriozeption und Joint position sense nach VKB-Rekonstruktion nicht wiederhergestellt werden [51] und dass dieses Defizit das Risiko für Folgeverletzungen des Kniegelenkes signifikant erhöht [8].

Bis zum heutigen Tag liegen vergleichbare detaillierte Untersuchungen nach VKB-Naht und InternalBrace™ Augmentation nicht vor. Solange die Literatur jedoch keine schlüssigen und reproduzierbaren biomechanischen und dynamischen Daten zu dieser OP-Technik liefert, wird es nachvollziehbarer Weise schwer sein, diese Technik als geeignete Alternative zu etablieren.

Um diese Lücke zu schließen, haben wir 2019 eine klinische und biomechanische Vergleichsstudie initiiert, die von der regionalen Ethikkommission genehmigt wurde und unter dem Kürzel "RetroBrace II" unter clinicaltrials.gov registriert ist [32]. Ziel dieser Studie ist es festzustellen, ob eine VKB-Naht und InternalBrace™ Augmentation zu einem klinisch, biomechanisch und sozioökonomisch zufriedenstellenden Ergebnis führt, welches dem der konventionellen VKB-Rekonstruktion entspricht oder sogar überlegen ist. Zeitgleich wird in Belgien unter Federführung von Christiaan Heusdens die Studie LIBRE durchgeführt [19]. Hier werden in einem multizentrischen Setting Patienten verglichen, die entweder mittels Ligamys™, InternalBrace™ oder VKB-Rekonstruktion operiert wurden. Endpunkte sind hierbei das klinische Outcome nach 2 Jahren, ferner die Versagensrate, isokinetische Muskelkraft und MRI-Untersuchungen nach 3, 6 und 12 Monaten [19].

Im Vergleich zur LIBRE Studie untersucht unsere Studie neben der isokinetischen Muskelkraft, Gleichgewicht und Propriozeption auch erstmals nach VKB-Naht und InternalBrace™ Augmentation die umfassende Biomechanik beim Gehen, Laufen sowie bei einbeinigen Sprüngen und Landungen. Insbesondere ist dabei das Verständnis des Einflusses von Kraftdefiziten von spezifischen Muskelgruppen auf die allgemeine Funktion bei Alltags- und sportlichen Aktivitäten von Bedeutung. Die gewonnenen Erkenntnisse können dabei helfen, die Behandlung künftiger Patienten zu optimieren und könnten neben einer früheren Rückkehr zu Arbeits- und Sportfähigkeit auch das Auftreten der unfallbedingten Kniegelenksarthrose verringern, was gleichzeitig zu einer Kostenreduktion für das Gesundheitssystem führen könnte.

Interessenkonflikt

Es liegt kein Interessenkonflikt vor.

Acknowledgements

Die Studie wird finanziell durch die Klinik für Orthopädie und Traumatologie des Universitätsspitals Basel sowie die Deutsche Arthrose-Hilfe e.V. unterstützt.

Appendix A. Zusätzliche Daten

Zusätzliche Daten verbunden mit diesem Artikel finden sich in der Online-Version unter: <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2021.01.010>.

Literatur

- [1] A. Achtnich, E. Herbst, P. Forkel, S. Metzloff, F. Sprenker, A.B. Imhoff, et al., Acute Proximal Anterior Cruciate Ligament Tears: Outcomes After Arthroscopic Suture Anchor Repair Versus Anatomic Single-Bundle Reconstruction, *Arthroscopy* 32 (2016) 2562–2569.
- [2] N. Adachi, M. Ochi, Y. Uchio, J. Iwasa, K. Ryoke, M. Kuriwaka, Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense, *Acta Orthop Scand* 73 (2002) 330–334.
- [3] S.S. Ahmad, A.J. Schreiner, M.T. Hirschmann, S. Schroter, S. Dobeles, M.D. Ahrend, et al., Dynamic intraligamentary stabilization for ACL repair: a systematic review, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27 (2019) 13–20.
- [4] S.S. Ahmad, K. Schurholz, E.F. Liechti, M.T. Hirschmann, S. Kohl, F.M. Klenke, Seventy percent long-term survival of the repaired ACL after dynamic intraligamentary stabilization, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28 (2020) 594–598.
- [5] D.J. Biau, C. Tournoux, S. Katsahian, P. Schranz, R. Nizard, ACL reconstruction: a meta-analysis of functional scores, *Clin Orthop Relat Res* 458 (2007) 180–187.
- [6] L. Buchler, D. Regli, D.S. Evangelopoulos, K. Bieri, S.S. Ahmad, A. Krismer, et al., Functional recovery following primary ACL repair with dynamic

- intraligamentary stabilization, *Knee* 23 (2016) 549–553.
- [7] L. Bühl, S. Müller, C. Nuesch, Ganbio-mechanik Muskelkraft und klinisches Outcome nach primärer VKB Naht mit ligamentärer Verstärkung (Internal Brace): 2 Jahres Follow-up, Abstract accepted: GAMMA Kongress (2019) 2020.
- [8] R.L. Cooper, N.F. Taylor, J.A. Feller, A randomised controlled trial of proprioceptive and balance training after surgical reconstruction of the anterior cruciate ligament, *Res Sports Med* 13 (2005) 217–230.
- [9] L. Engebretsen, P. Benum, O. Fasting, A. Molster, T. Strand, A prospective, randomized study of three surgical techniques for treatment of acute ruptures of the anterior cruciate ligament, *Am J Sports Med* 18 (1990) 585–590.
- [10] J.C. Erhart-Hledik, C.R. Chu, J.L. Asay, T.P. Andriacchi, Longitudinal changes in knee gait mechanics between 2 and 8 years after anterior cruciate ligament reconstruction, *J Orthop Res* 36 (2018) 1478–1486.
- [11] D.S. Evangelopoulos, S. Kohl, S. Schwienbacher, B. Gantenbein, A. Exadaktylos, S.S. Ahmad, Collagen application reduces complication rates of mid-substance ACL tears treated with dynamic intraligamentary stabilization, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (2017) 2414–2419.
- [12] J.A. Feagin Jr., W.W. Curl, Isolated tear of the anterior cruciate ligament: 5-year follow-up study, *Am J Sports Med* 4 (1976) 95–100.
- [13] R.B. Frobell, E.M. Roos, H.P. Roos, J. Ranstam, L.S. Lohmander, A randomized trial of treatment for acute anterior cruciate ligament tears, *N Engl J Med* 363 (2010) 331–342.
- [14] A. Gokeler, A. Benjaminse, T.E. Hewett, S.M. Lephart, L. Engebretsen, E. Ageberg, et al., Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant? *Br J Sports Med* 46 (2012) 180–192.
- [15] T. Grontvedt, L. Engebretsen, P. Benum, O. Fasting, A. Molster, T. Strand, A prospective, randomized study of three operations for acute rupture of the anterior cruciate ligament Five-year follow-up of one hundred and thirty-one patients, *J Bone Joint Surg Am* 78 (1996) 159–168.
- [16] J. Haberli, L. Jaberg, K. Bieri, S. Eggli, P. Henle, Reinterventions after dynamic intraligamentary stabilization in primary anterior cruciate ligament repair, *Knee* 25 (2018) 271–278.
- [17] F.L. Hefti, A. Kress, J. Fasel, E.W. Morscher, Healing of the transected anterior cruciate ligament in the rabbit, *J Bone Joint Surg Am* 73 (1991) 373–383.
- [18] C.H.W. Heusdens, K. Blockhuys, E. Roelant, L. Dossche, F. Van Glabbeek, P. Van Dyck, Suture tape augmentation ACL repair, stable knee, and favorable PROMs, but a re-rupture rate of 11% within 2 years, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*; (2021), <http://dx.doi.org/10.1007/s00167-020-06399-2>.
- [19] C.H.W. Heusdens, K. Zazulia, E. Roelant, L. Dossche, D. van Tiggelen, J. Roeykens, et al., Study protocol: a single-blind, multi-center, randomized controlled trial comparing dynamic intraligamentary stabilization, internal brace ligament augmentation and reconstruction in individuals with an acute anterior cruciate ligament rupture: LIBR study, *BMC Musculoskelet Disord* 20 (2019) 547.
- [20] C. Imhauser, C. Mauro, D. Choi, E. Rosenberg, S. Mathew, J. Nguyen, et al., Abnormal tibiofemoral contact stress and its association with altered kinematics after center-center anterior cruciate ligament reconstruction: an in vitro study, *Am J Sports Med* 41 (2013) 815–825.
- [21] T. Iriuchishima, B. Goto, Systematic Review of Surgical Technique and Tunnel Target Points and Placement in Anatomical Single-Bundle ACL Reconstruction, *J Knee Surg*; (2020), <http://dx.doi.org/10.1055/s-0040-1710521>.
- [22] A. Jonkergouw, J.P. van der List, G.S. DiFelice, Arthroscopic primary repair of proximal anterior cruciate ligament tears: outcomes of the first 56 consecutive patients and the role of additional internal bracing, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* (2019), <http://dx.doi.org/10.1007/s00167-018-5338-z>.
- [23] J. Kartus, L. Magnusson, S. Stener, S. Brandsson, B.I. Eriksson, J. Karlsson, Complications following arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction. A 2-5-year follow-up of 604 patients with special emphasis on anterior knee pain, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 7 (1999) 2–8.
- [24] T. Khan, A. Alvand, D. Prieto-Alhambra, D.J. Culliford, A. Judge, W.F. Jackson, et al., ACL and meniscal injuries increase the risk of primary total knee replacement for osteoarthritis: a matched case-control study using the Clinical Practice Research Datalink (CPRD), *Br J Sports Med*; (2018), <http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2017-097762>.
- [25] S. Kohl, D.S. Evangelopoulos, S.S. Ahmad, H. Kohlhof, G. Herrmann, H. Bonnel, et al., A novel technique, dynamic intraligamentary stabilization creates optimal conditions for primary ACL healing: a preliminary biomechanical study, *Knee* 21 (2014) 477–480.
- [26] M. Krause, F. Freudenthaler, K.H. Frosch, A. Achtnich, W. Petersen, R. Akoto, Operative Versus Conservative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Rupture, *Dtsch Arztebl Int* 115 (2018) 855–862.
- [27] L.S. Lohmander, A. Ostenberg, M. Englund, H. Roos, High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury, *Arthritis Rheum* 50 (2004) 3145–3152.
- [28] G.M. Mackay, M.J. Blyth, I. Anthony, G.P. Hopper, W.J. Ribbans, A review of ligament augmentation with the Internal Brace: the surgical principle is described for the lateral ankle ligament and ACL repair in particular, and a comprehensive review of other surgical applications and techniques is presented, *Surg Technol Int* 26 (2015) 239–255.
- [29] P. Massey, D. Parker, K. McClary, J. Robinson, R.S. Barton, G.F. Solitro, Biomechanical comparison of anterior cruciate ligament repair with internal brace augmentation versus anterior cruciate ligament repair without augmentation, *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 77 (2020) 105065.
- [30] G. Mattiassich, R. Ortmaier, H. Kindermann, J. Barthofer, I. Vasvary, S.T. Kulnik, et al., Clinical and radiological results after Internal Brace suture versus the all-inside reconstruction technique in anterior cruciate ligament tears 12 to 18 months after index surgery, *Sportverletz Sportschaden*; (2020), <http://dx.doi.org/10.1055/a-1281-8627>.
- [31] J. Mehl, A. Otto, J.B. Baldino, A. Achtnich, R. Akoto, A.B. Imhoff, et al., The ACL-deficient knee and the prevalence of meniscus and cartilage lesions: a systematic review and meta-analysis (CRD42017076897), *Arch Orthop Trauma Surg* 139 (2019) 819–841.

- [32] S. Müller, Clinical and Functional Outcomes 2 Years After ACL Repair and InternalBrace Ligament Augmentation in Comparison With ACL Reconstruction (RetroBRACE II). (2019), [https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT04429165?](https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT04429165?term=RetroBrace&draw=2&rank=2)
- [33] S. Müller, L. Bühl, C. Nuesch, Biomechanical and clinical outcomes after ACL repair and InternalBrace™ ligament augmentation, 37th annual congress Gesellschaft für Arthroscopie und Gelenkchirurgie (AGA) (2020).
- [34] M.M. Murray, B.C. Fleming, G.J. Badger, B.T. Team, C. Freiberger, R. Henderson, et al., Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair Is Not Inferior to Autograft Anterior Cruciate Ligament Reconstruction at 2 Years: Results of a Prospective Randomized Clinical Trial, *Am J Sports Med* 48 (2020) 1305–1315.
- [35] M.M. Murray, L.A. Kalish, B.C. Fleming, B.T. Team, B. Flutie, C. Freiberger, et al., Bridge-Enhanced Anterior Cruciate Ligament Repair: Two-Year Results of a First-in-Human Study, *Orthop J Sports Med* 7 (2019), 2325967118824356.
- [36] N. Nakamura, S. Horibe, S. Sasaki, T. Kitaguchi, M. Tagami, T. Mitsuoka, et al., Evaluation of active knee flexion and hamstring strength after anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring tendons, *Arthroscopy* 18 (2002) 598–602.
- [37] P. Neuman, M. Englund, I. Kostogianis, T. Friden, H. Roos, L.E. Dahlberg, Prevalence of tibiofemoral osteoarthritis 15 years after nonoperative treatment of anterior cruciate ligament injury: a prospective cohort study, *Am J Sports Med* 36 (2008) 1717–1725.
- [38] D.H. O'Donoghue, C.A. Rockwood Jr., G.R. Frank, S.C. Jack, R. Kenyon, Repair of the anterior cruciate ligament in dogs, *J Bone Joint Surg Am* 48 (1966) 503–519.
- [39] H.H. Paessler, The history of the cruciate ligaments: some forgotten (or unknown) facts from Europe, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1 (1993) 13–16.
- [40] T.L. Sanders, A. Pareek, T.E. Hewett, B. A. Levy, D.L. Dahm, M.J. Stuart, et al., Long-term rate of graft failure after ACL reconstruction: a geographic population cohort analysis, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (2017) 222–228.
- [41] T.L. Sanders, A. Pareek, H.M. Kremers, A.J. Bryan, B.A. Levy, M.J. Stuart, et al., Long-term follow-up of isolated ACL tears treated without ligament reconstruction, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (2017) 493–500.
- [42] S.F. Scanlan, A.M. Chaudhari, C.O. Dyrby, T.P. Andriacchi, Differences in tibial rotation during walking in ACL reconstructed and healthy contralateral knees, *J Biomech* 43 (2010) 1817–1822.
- [43] B. Schliemann, J. Glasbrenner, D. Rosenbaum, K. Lammers, M. Herbort, C. Domnick, et al., Changes in gait pattern and early functional results after ACL repair are comparable to those of ACL reconstruction, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26 (2018) 374–380.
- [44] S. Takagi, G. Omori, H. Koga, K. Endo, Y. Koga, A. Nawata, et al., Quadriceps muscle weakness is related to increased risk of radiographic knee OA but not its progression in both women and men: the Matsudai Knee Osteoarthritis Survey, *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26 (2018) 2607–2614.
- [45] D.C. Taylor, M. Posner, W.W. Curl, J.A. Feagin, Isolated tears of the anterior cruciate ligament: over 30-year follow-up of patients treated with arthrotomy and primary repair, *Am J Sports Med* 37 (2009) 65–71.
- [46] J.P. van der List, G.S. DiFelice, Preservation of the Anterior Cruciate Ligament: A Treatment Algorithm Based on Tear Location and Tissue Quality, *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 45 (2016) E393–E405.
- [47] J.P. van der List, G.S. DiFelice, Range of motion and complications following primary repair versus reconstruction of the anterior cruciate ligament, *Knee* 24 (2017) 798–807.
- [48] J.P. van der List, G.S. DiFelice, Role of tear location on outcomes of open primary repair of the anterior cruciate ligament: A systematic review of historical studies, *Knee* 24 (2017) 898–908.
- [49] J.P. van der List, A. Jonkergouw, A. van Noort, G. Kerkhoffs, G.S. DiFelice, Identifying candidates for arthroscopic primary repair of the anterior cruciate ligament: A case-control study, *Knee* 26 (2019) 619–627.
- [50] C.F. van Eck, O. Limpisvasti, N.S. ElAttrache, Is There a Role for Internal Bracing and Repair of the Anterior Cruciate Ligament?. A Systematic Literature Review, *Am J Sports Med* 46 (2018) 2291–2298.
- [51] H.B. Yosmaoglu, G. Baltaci, D. Kaya, H. Ozer, Tracking ability, motor coordination, and functional determinants after anterior cruciate ligament reconstruction, *J Sport Rehabil* 20 (2011) 207–218.
- [52] H.B. Yosmaoglu, G. Baltaci, D. Kaya, H. Ozer, A. Atay, Comparison of functional outcomes of two anterior cruciate ligament reconstruction methods with hamstring tendon graft, *Acta Orthop Traumatol Turc* 45 (2011) 240–247.
- [53] S. Zaffagnini, A. Grassi, G.M. Marchegiani Muccioli, K. Tsapralis, M. Ricci, L. Bragonzoni, et al., Return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction in professional soccer players, *Knee* 21 (2014) 731–735.

Korrespondenzadresse:

Sebastian Müller, Klinik für Orthopädie und Traumatologie, Universitätsspital Basel, Spitalstraße 21, 4031, Basel, Schweiz. Tel.: +41 (0)61-5565109
E-Mail: s.mueller@usb.ch

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect