

Biomechanik von Kreuzband und Kreuzbandersatz

Kniegelenkinematik des VKB-intakten, VKB-defizienten und VKB-rekonstruierten Kniegelenkes

Thore Zantop¹, Christian Zantop¹, Wolf Petersen²

¹ Sporthopaedicum Straubing, Bahnhofplatz 27, 94315 Straubing (Deutschland)

² Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Martin Luther Krankenhaus, Berlin (Deutschland)

Zusammenfassung

Die Gelenkinematik des Kniegelenkes wird durch das vordere Kreuzband (VKB) massgeblich bestimmt. Das VKB sichert neben der anterioren Translation auch die Rotationsstabilität des Kniegelenkes. Bei einer VKB-Ruptur ist somit die anteriore Translation mithilfe des Lachman-Tests deutlich erhöht. Zeitgleich ist ein Subluxations-/Repositionsphänomen zu verzeichnen, welches klinisch über den Pivot-shift-Test erfasst wird. Beide pathologischen Instabilitäten können im Rahmen von In-vitro-Studien simuliert werden und somit kann die Kinematik von einzelnen rekonstruktiven Strategien überprüft werden.

Zur Wiederherstellung der Kinematik ist eine VKB-Rekonstruktion notwendig. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass beide Qualitäten – anteriore Instabilität und Rotationsinstabilität – limitiert werden. Sowohl bei Einzel- als auch bei Doppelbündelrekonstruktion ist die femorale Tunnelposition der Schlüssel zum Erfolg. Eine Rekonstruktion mit steilem femoralem Tunnel resultiert häufig in einem Kniegelenk, das im Lachman-Test stabil erscheint, aber eine ausgeprägte Rotationsinstabilität aufweist.

Die tibiale Tunnelposition sichert die freie Beweglichkeit, insbesondere eine freie Extension. Bei femoraler Fehllage ist häufig versucht worden, diese mithilfe eines posterioren tibialen Tunnels zu kompensieren. Dies führt allerdings zu stark veränderter Kinematik.

Summary

The knee joint kinematics are highly depending on the integrity of the ACL. The ACL is the primary restraint to both, anterior tibial translation and rotatory instability. Subsequently, both pathologic instabilities can be recognized during clinical examination by Lachman and pivot shift test. These tests can be simulated in in-vitro tests and the resulting knee joint kinematics are obtained before different surgical strategies are performed in the patient.

To restore the knee kinematics in cases with ACL rupture a reconstruction is necessary. Aim should be to obliterate anterior tibial translation and rotational instability. Femoral tunnel position is the key to restore the intact kinematics in single and double bundle reconstruction. A steep femoral provides a stable Lachman (low anterior translation) but persisting rotational instability (positive pivot shift test).

At the tibial side, former strategies are compensation a femoral malplacement by using a posterior tibial tunnel location. This non-anatomic tibial tunnel placement is altering the kinematics especially with regard to range of motion.

Eine normwertige Belastung des humanen Kniegelenkes wird durch die Biomechanik und Kinematik des Gelenkes sichergestellt. Kommt es zu einer Veränderung der biomechanischen Beanspruchung, führt dies zu einer Überbeanspruchung einzelner kartilaginärer Kompartimente oder ligamentärer Strukturen. Die klinische Folge ist in zahlreichen Studien berichtet worden: Präarthrose und frühzeitige Dekompensation von Knorpelbezirken.

Die biomechanischen Besonderheiten des humanen Kniegelenkes werden in Struktureigenschaften und Kniegelenkinematik eingeteilt. Die strukturellen Eigenschaften des intakten VKB und einzelner rekonstruktiver Techniken beschreiben das Verhalten des Ligamentes bei einer Belastung. Hier kann die Steifheit, Versagenslast und maximale Versagenslast zur Quantifizierung erhoben werden. Eine Erhebung der Elongation unter einem zyklischen Belastungsprotokoll ist zur Beurteilung von repetitiven Belastungen der Rehabilitation wichtig. Es werden in der Literatur zahlreiche Fixationsstrategien beschrieben. Obwohl diese teilweise nur geringe Struktureigenschaften aufweisen, wird über gute bis exzellente postoperative Ergebnisse nach VKB-Rekonstruktion berichtet. Wichtiger als die Struktureigenschaften scheint daher die Gelenkinematik zu sein. Unter Kinematik des Kniegelenkes versteht man die Stellung der gelenkbildenden Knochen zueinander unter der Einwirkung definierter äusserer Kräfte. Ziel dieses Beitrages ist es, die Kniegelenkinematik des VKB intakten, VKB defizienten und VKB rekonstruierten Kniegelenkes genauer zu beleuchten.

Kniegelenkinematik des VKB intakten Kniegelenkes

Für die Sicherstellung der Kniegelenkinematik ist in erster Linie der sogenannte zentrale Pfeiler, das Zusammenspiel des hinteren (HKB) und vorderen Kreuzbandes (VKB), verantwortlich. Aufgrund des obliquen intraartikulären Verlaufs vom Ursprung am lateralen Femurkondylus bis zur tibialen Insertion zwischen dem medialen und lateralen Höcker der tibialen Eminentia sichert das VKB zwei Hauptbe-

wegungsrichtungen im intakten Kniegelenk. Zum einen wird durch den Verlauf des Ligamentes in der Sagittalebene die anteriore tibiale Translation gegen eine anterior gerichtete tibiale Kraft limitiert. Die zweite Hauptfunktion ist die Sicherung der sogenannten Rotationsstabilität des Kniegelenkes. Die Definition der Rotationsstabilität des Kniegelenkes ist in der Literatur häufig nicht ausreichend definiert. Hierunter wird nicht die Rotation der Tibia im Vergleich zum Femur verstanden. Diese reine tibiale Innen- und Aussenrotation wird neben der Muskulatur in erster Linie durch die Integrität des medialen Kollateralbandkomplexes und des lateralen Kollateralbandes geführt (Amis et al. 1991, 2005 Kanamori et al. 2002, Zantop et al. 2007). Das Ausmass dieser Rotationsbewegungen ist bei einer isolierten VKB-Läsion nicht erhöht. Unter dem Begriff der Rotationsstabilität wird tatsächlich die Limitation der anterioren tibialen Translation unter einer Rotationskraft verstanden (Galway et al. 1980, Diermann et al. 2008).

Das Verständnis dieser beiden kinematischen Führungen ist für die Durchführung einer korrekten klinischen Untersuchungstechnik essenziell (Zantop et al. 2012). In älteren Literaturhinweisen wurde zur Diagnostik häufig der sogenannte vordere Schubladentest verwendet (*Abb. 1*). Hierunter versteht man die anteriore tibiale Translation in 90° Knieflexion. Hier ist es entscheidend, darauf zu achten, dass es nicht zu einer Ko-Kontraktion der ischiokruralen Muskulatur kommt (Angst, Schmerzen, generell hoher Muskeltonus). Aufgrund des Hebelarmes der Hamstring- und Bizepsmuskulatur kommt es bei einer Kontraktion zu einer Limitation der vorderen Schublade, und das Ergebnis wird somit als negativ interpretiert. Sollte der vorderen Schublade-Test positiv ausfallen, so muss nach assoziierten Verletzungen geahndet werden (HKB-Läsion, instabile Meniskusläsionen). Ein Testen der anterioren tibialen Translation in 20° Kniebeugstellung wird als Lachman-Test definiert (*Abb. 2*). Im Vergleich zu der 90° Flexionsposition ist die Sensitivität erhöht. Zusätzlich kann die anteriore tibiale Translation mithilfe einer instrumentierten Messung quantifiziert werden (KT 1000 Test) (Dandy et al. 1981). Hier muss darauf geachtet werden, dass die Werte der anterioren Translation in Relation zum kontralateralen (intakten) Knie-

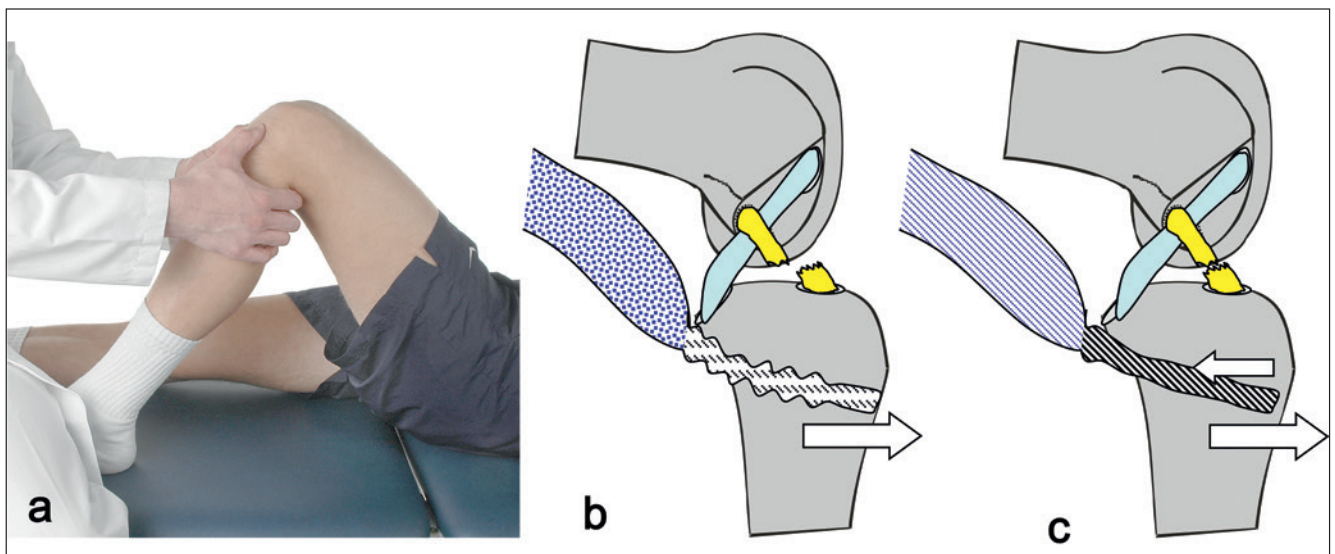


Abbildung 1: Klinische Testung der vorderen Schublade (a). Schematische Darstellung (b). Bei Anspannung der ischiokruralen Muskeln wird die vordere Schublade deutlich reduziert (c).

gelenk interpretiert werden. Insbesondere bei weiblichen und männlichen Sportlern kann die physiologische Laxizität der Bänder deutlich unterschiedlich sein, sodass eine Betrachtung der absoluten Werte alleine irreführend in der Diagnostik sein kann. Neben der Analyse der absoluten Werte ist ausserdem die Erfassung des Anschlages von essenzieller Bedeutung. Kommt es bei dieser kinematischen Untersuchung zu einem harten Anschlag, so ist das VKB intakt. Vielmehr muss die Diagnostik erweitert werden, um weitere Pathologien auszuschliessen, die die Zentrierung des Kniegelenkes beeinflussen. In Fällen mit deutlich positivem Lachman-Test, aber hartem Anschlag muss eine HKB-Läsion ausgeschlossen werden.

In der klinischen Praxis wird die Rotationsinstabilität mit dem Pivot-shift-Test erfasst (Amis et al. 1998, 2005, Yagi et al. 2007). Obwohl dieser Test signifikant mit subjektiven Instabilitätsgefühlen korreliert (Kocher et al. 2004), ist die Befundung des Tests streng subjektiv und weist eine hohe Variabilität bei der Durchführung von unterschiedlichen Untersuchern auf (Amis et al. 1998). Im Gegensatz zur Testung der anterioren tibialen Translation unter anteriorer Kraft (KT 1000) gibt es bisher keine Möglichkeit, die Translation unter Pivot-shift-Kraft zu quantifizieren. Die Quantifizierung des Pivot-shift-Tests ist zurzeit einer der «hot topics» der sportmedizinischen Wissenschaft, wobei allerdings einige Rückschläge zu erwarten sind. Quantifizierende Systeme, die in erster Linie die Rotation messen und nicht die anteriore Translation, erscheinen nicht zielbringend. Die Problematik der Erfassung des Pivot-shift-Tests liegt in der dynamischen Komponente des erstmalig 1967 von Lemaire beschriebenen Tests (dynamischer anteriorer Subluxations-Test, Lemaire 1967). Der Test gewann deutlich an Bedeutung durch die spätere Publikation von Galway und MacIntosh als Pivot-Shift-Test (Galway und MacIntosh 1980). Bei der Ausführung wird das gestreckte Bein mit der einen Hand am Sprunggelenk angehoben und innenrotiert (Abb. 3). Mit der anderen Hand wird auf Höhe der proximalen Tibia ein leichter Valgusstress appliziert. Bei einer VKB-Ruptur kommt es so zu einer anterioren Subluxationsstellung des lateralen Tibiaplateaus. Nun wird eine zunehmende Flexionsbewegung durchgeführt. Aufgrund der Spannungszunahme und der Änderung der Zugrichtung des Tractus iliotibialis kommt es ab ca. 20–30° zu einer Reposition der anterioren Subluxationsstellung (Abb. 3b). Aufgrund der auftretenden Kräfte bei der Reposition sollte der Test nicht repetitiv durchgeführt werden. Da sowohl falsch positive (bei genereller Laxizität) als auch falsch negative Ergebnisse vorliegen können, besitzt der Pivot-shift-Test eine hohe Spezifität (98%), aber geringe Sensitivität (Benjaminse et al. 2006). Ein falsch negatives Ergebnis kann durch Anspannung der ischiokruralen Muskulatur (bei akuter Verletzung, durch externe Kompression wie z.B. aufgepumpte Blutsperre oder bei assoziierten Verletzungen) auftreten. Bei Verletzungen des Tractus iliotibialis kann beispielsweise keine Kraft zur Reposition übertragen werden und so der Test negativ ausfallen.

Beide kinematischen Phänomene, Lachman- und Pivot-shift-Test, sind im intakten Kniegelenk ohne assoziierte Läsion oder Hyperlaxizität negativ. Dies kann im Rahmen von kinematischen Untersuchungen sehr hilfreich sein. Mithilfe eines Roboter/Kraft-Momentsensor/-Systems können die Tests simuliert und gleichzeitig die resultierende Instabilität analysiert werden. Da anschliessend das Kniegelenk durch eine Modifikation (VKB-Resektion oder -Rekonstruktion) in



Abbildung 2: Stabiler Lachman-Test

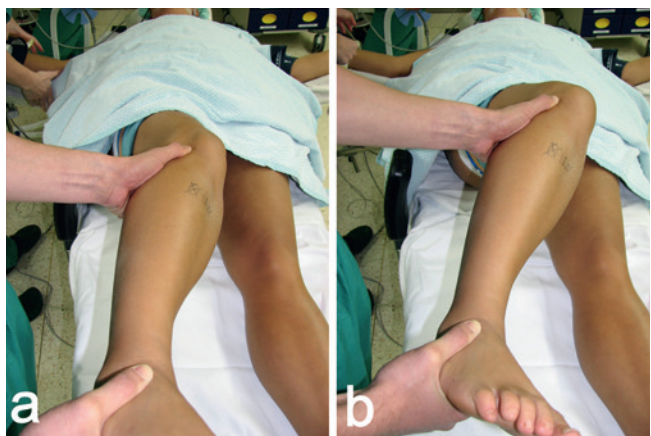


Abbildung 3: Klinische Durchführung des Pivot-shift-Tests. Durch Valgusstress und Innenrotation (a) kommt es mit zunehmender Flexion zum Subluxations-/Repositionsphänomen (b).

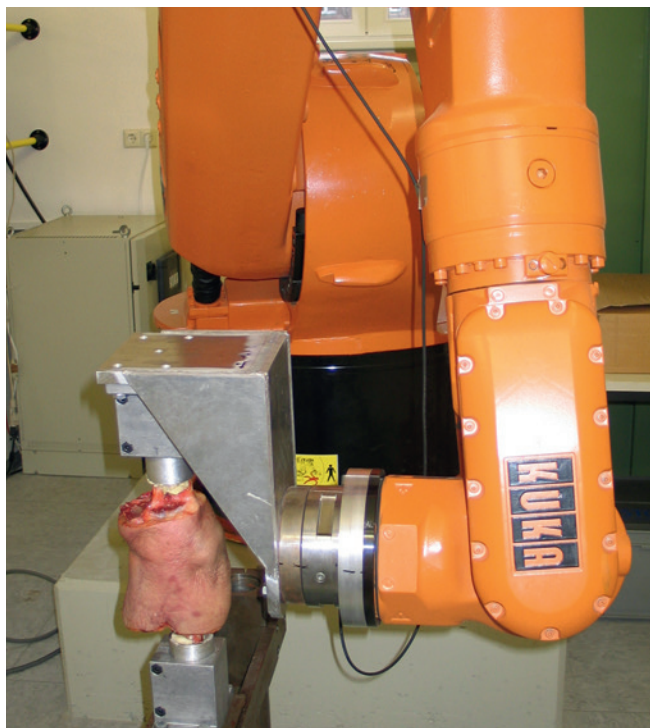


Abbildung 4: Roboter/Kraft-Momentsensor-System zur Analyse der Gelenkinematik.

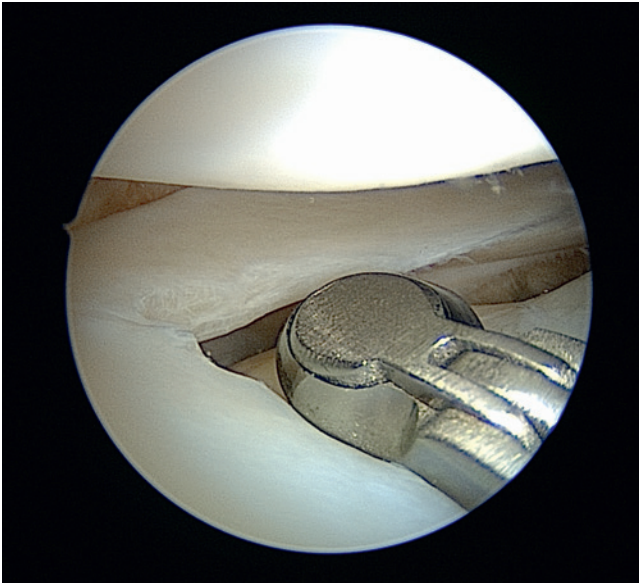


Abbildung 5: Schematische Darstellung der IM-Hinterhornbelastung im VKB intakten (a) und defizienten Kniegelenk (b).

einen anderen Zustand überführt wird, können so unterschiedliche Instabilitätsszenarien (intakt/VKB defizient/VKB rekonstruiert) und unterschiedliche Rekonstruktionstechniken (Einzelbündel mediale Portaltechnik/Einzelbündel transtibiäre Technik/Doppelbündeltechnik) miteinander verglichen werden, und die resultierende Kinematik überprüft werden bevor diese Operationen am Patienten genutzt werden. Die meisten der in dieser Arbeit zitierten Daten resultieren aus Versuchsaufbauten, in denen ein Roboter/Kraft-Momentsensor-System angewendet wurde (Abb. 4).

Kniegelenkinematik des VKB defizienten Kniegelenkes

Eine isolierte Ruptur des zentralen Pfeilers – HKB oder VKB – führt zu einer signifikanten Veränderung der Kniekinematik. Das klinische Korrelat dieser Veränderung ist ein subjektives Instabilitätsgefühl beim Patienten. Der natürliche Verlauf des VKB insuffizienten Kniegelenkes ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Die Instabilität ist die mit einem erhöhten Risiko der Entwicklung von chondralen oder meniskalen Folgeverletzungen verbunden (Dandy et al. 1994, Andriacchi et al. 2006, Roos et al. 1995, Meunier et al. 2007, Levy et al. 2003, Gabriel et al. 2003, Vercillo et al. 2007, Zantop et al. 2007). Roos et al. konnten zeigen, dass der typische Patient mit einer VKB-Läsion und einer damit verbundenen posttraumatischen Osteoarthritis 15–20 Jahre jünger als ein Patient mit primärer Osteoarthritis ist (Roos et al. 1995). Dass die veränderte Kinematik des Gelenkes nicht nur ein subjektives Problem ist, belegen Daten von Meunier et al. (2007). In dieser randomisierten Studie wurden von 100 Patienten 44 Patienten mit einem Durchschnittsalter von 22 Jahren operativ versorgt während für 56 Patienten (Durchschnittsalter 21 Jahre) das konservative Therapieregime gewählt wurde. Die Randomisierung erfolgte nach geradem oder ungeradem Geburtsjahr. Ein Drittel der nicht operativ versorgten Patienten äusserte den Wunsch nach operativer Therapie aufgrund von Instabilitätsgefühlen. Eine frühzeitige operative Therapie der VKB-Ruptur konnte die Häufigkeit von sekundären Meniskusschäden reduzieren (Meunier et al. 2007). Da 66 % aller

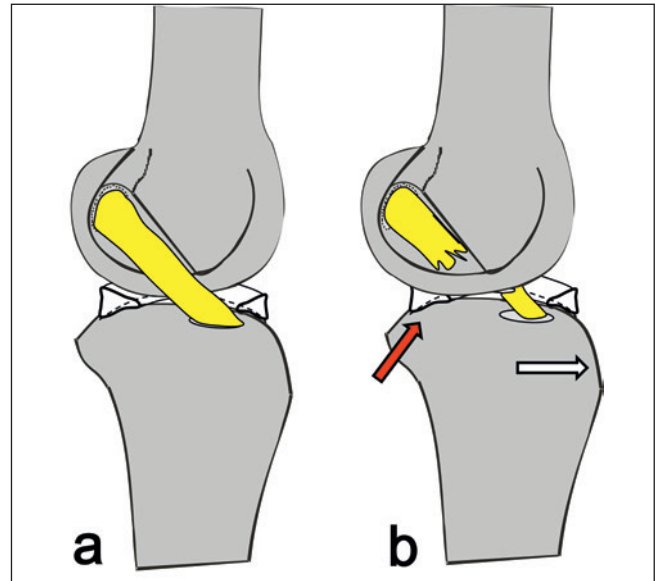


Abbildung 6: Sparsame Meniskusteilresektion bei VKB-Insuffizienz.

Patienten mit Meniscektomie einen frühen Beginn von Osteoarthritis zeigten, folgerten die Autoren, dass eine operative Therapie der VKB-Ruptur vorteilhaft für das Langzeitergebnis sei. Die Instabilität in der Sagittalebene mit vermehrter anteriorer Translation der Tibia führt zu einer vermehrten Belastung des Hinterhorns des medialen und lateralen Meniskus (Abb. 5) (Daniel et al. 1994). Hier sollte nur eine sparsame Meniskusteilresektion erfolgen (Abb. 6). Kommt es nun zu einer axialen Belastung, so ist die anteriore tibiale Translation aufgrund des Gefälles des Tibiakopfes zusätzlich erhöht (Giffin et al. 2006). Levy et al. berichten eine Inzidenz von Meniskusläsionen bei nicht operativer Therapie einer VKB-Ruptur von 40 % nach einem Jahr, 60 % nach fünf Jahren und 80 % nach 10 Jahren nach Ruptur (Levy et al. 2003).

Zusätzlich zu der Instabilität in der Sagittalebene, kommt es bei einer VKB-Insuffizienz zu einer Verlagerung des Drehzentrums nach medial (Abb. 7). Die Verlagerung der Rotationsachse bewirkt eine gekoppelte anteriore tibiale Translation und vergrößert in Kombination mit der vermehrten Innenrotation auf diese Weise die Bewegung des lateralen Tibiaplateaus (Amis et al. 2005, Zantop et al. 2007, Petersen und Zantop 2007). Dieser Mechanismus wird mit dem Pivot-shift-Test erfasst (Galway und MacIntosh 1980). Beim Pivot-shift-Test wird diese vermehrte anteriore Translation und Innenrotation des lateralen Tibiaplateaus bei 30° Beugung durch die Zugrichtung des Tractus iliotibialis reponiert (siehe oben). Andriacchi et al. untersuchten die Auswirkungen einer solchen Rotationsinstabilität auf die Knorpeloberfläche mithilfe von Ganganalysen und «finite element modelling» (Andriacchi et al. 2006). Die Autoren konnten eine vermehrte Belastung und somit frühere Arthrosezeichen im medialen Kompartiment beschreiben. Als Ursache gaben die Autoren die Verlagerung des Rotationszentrums nach medial bei VKB-Ruptur an.

Die Faserzüge des VKB wirken als synergistische Bündel. Da das posterolaterale (PL) Bündel in Streckung gespannt ist, stabilisiert es unter einem simulierten Lachman-Test vornehmlich in extensionsnahen Kniestellungen (Gabriel et al. 2003, Vercillo et al. 2007, Zantop et al. 2007). Zusätzlich sichert das PL Bündel aufgrund seines schrägen intra-artiku-

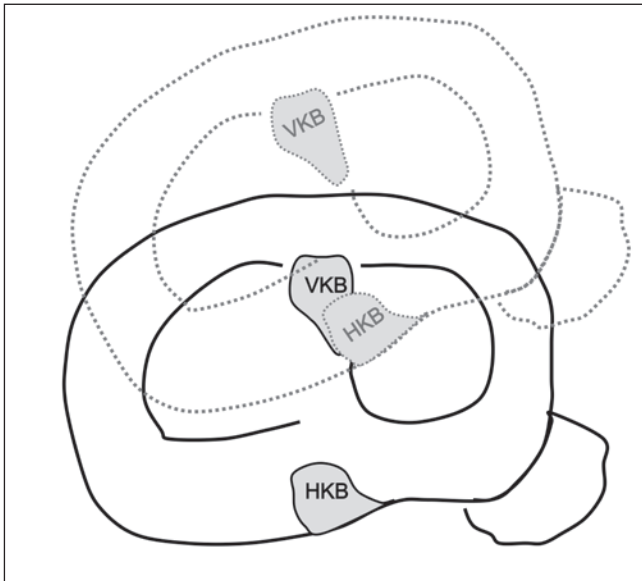


Abbildung 7: Bei VKB-Insuffizienz verlagert sich das Drehzentrum des Kniegelenkes in das mediale Kompartiment und führt hier zu einer Überlastung. Zeitgleich kommt es durch die gekoppelten Bewegungen zu vermehrten Scherkräften im lateralen Kompartiment.

lären Verlaufes auch die Rotationsstabilität. Unter Verwendung eines an einen Kraft-Moment-Sensor gekoppelten Roboters konnte gezeigt werden, dass unter einer Kombination aus Valgus-Stress und Rotationslast (simulierter Pivot-shift-Test) hohe Spannungen im PL Bündel entstehen (Sakane et al. 1997, Gabriel et al. 2004). Das anteromediale (AM) Bündel kommt bei zunehmender Beugung unter Spannung. Die stabilisierende Funktion ist bei einer Flexion von ca. 60° am ausgeprägtesten (Zantop et al. 2007). Bei erfolgreicher Rotationskraft (simulierter Pivot-shift-Test) werden nur geringe Kräfte gemessen.

Kniegelenkinematik des VKB rekonstruierten Kniegelenkes

Ziel einer VKB-Rekonstruktion ist eine Wiederherstellung der AP Stabilität und der Rotationsstabilität. Hier hat insbesondere die femorale Tunnelposition einen entscheidenden Einfluss auf beide Stabilitätskomponenten (Musahl et al. 2005, Woo et al. 2002). Das Konzept der Isometrie muss allerdings als nicht anatomisch angesehen werden (Amis et al. 2005, Musahl et al. 2005). Aufgrund der Einteilung der Fasern des VKB in zwei funktionelle Bündel scheinen die Bestrebungen, eine isometrische Tunnelpositionierung zu erreichen, nicht der komplexen Anatomie gerecht zu werden.

Bei einer Rekonstruktion mit einer steilen femoralen Tunnelposition kann die umfassende Kinematik nur unzureichend wiederhergestellt werden (Woo et al. 2002). Verschiedenen Studien konnten zeigen, dass sich die Rotationsstabilität einer Einzelbündel-Rekonstruktion verbessert, je weiter der Tunnel im PL Ursprung liegt (Abb. 8).

Loh et al. untersuchten ebenfalls mit einem Roboter/KMS-System zwei unterschiedliche femorale Tunnelpositionen bei Einzelbündel-VKB-Rekonstruktion (Loh et al. 2002). Die Ergebnisse zeigten anhand einer signifikant reduzierten anterioren tibialen Translation und höheren Spannungen im VKB-Transplantat, dass eine femorale Tunnelpositionierung in der 10-Uhr-Position effektiver die Rotationsstabilität des intakten Kniegelenkes wiederherstellt als eine 11-Uhr-Positionierung. Allerdings konnten beide unterschiedlichen femoralen Tunnelpositionen bei Einzelbündel-Rekonstruktionen nicht die Rotationsstabilität des intakten Kniegelenkes wiederherstellen. Arnold et al. berichteten, dass eine VKB Rekonstruktion mit femoraler Tunnelposition in der 9-Uhr-Position das «physiologische Spannungsverhalten des VKB» replizieren konnte während eine femorale Tunnelposition in der 10- und 11-Uhr-Positionierung die Spannung des intakten VKB nicht replizieren konnte (Arnold et al. 2005).

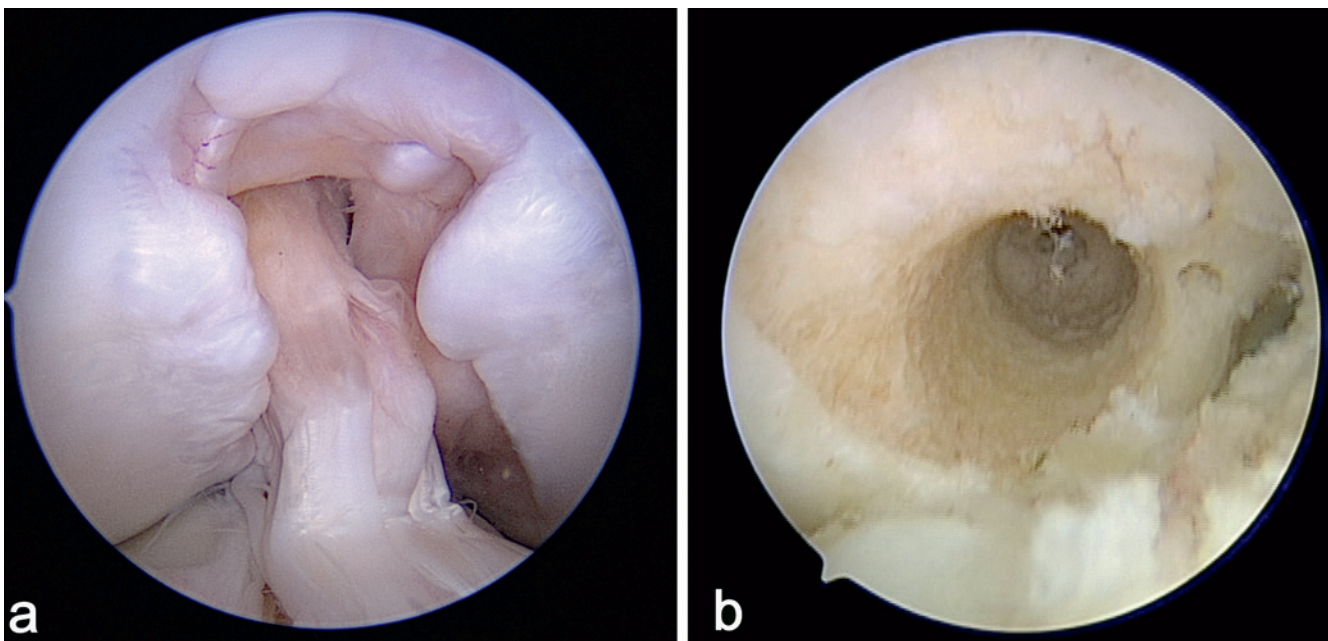


Abbildung 8: Klinisches Beispiel einer femoralen Fehlplatzierung beim Einzelbündel (a). Es kommt zu einem steilen Transplantatverlauf mit pathologischem Impingement (Visualisation durch das laterale Portal). Anatomische femorale Tunnelplatzierung (b). Der femorale Tunnel liegt an der Wand der interkondylären Notch zwischen dem AM und PL Bündel (Visualisation durch das mediale Portal).

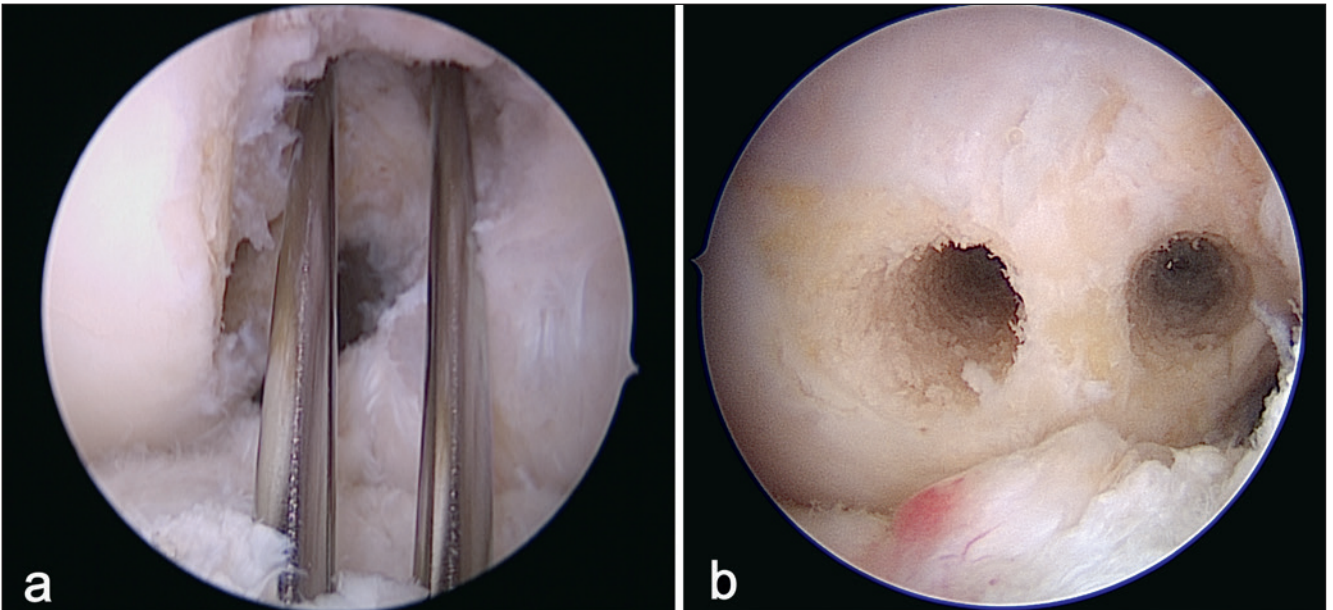


Abbildung 9: Klinisches Beispiel einer femoralen Fehlplatzierung beim Doppelbündel (a). Durch die transtibiale Technik und die einfache tibiale Tunneltechnik liegen die beiden femoralen Tunnel steil im Dach der interkondylären Notch. Anatomische femorale Tunnelplatzierung an der Wand (b, Visualisation durch das mediale Portal).

Aufgrund der komplexen Anatomie und der kinematischen Details der VKB-Struktur scheint theoretisch dieses Konzept eine erfolversprechende Strategie zu sein. Yagi et al. haben unter Verwendung eines an einen Kraft-Moment-Sensor gekoppelten Roboters eine Technik, mit der beide Bündel des VKB rekonstruiert wurden (Doppelbündel-Technik, femoral ein, tibial zwei Tunnel), mit einer Einbündel-Technik verglichen (Yagi et al. 2002). In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Spannungen der Transplantate einer Dop-

pelbündelrekonstruktion auf eine anteriore tibiale Translation (134 N) vergleichbar denen des vorderen Kreuzbandes sind (97%). Bei einer Einzelbündel-Rekonstruktion erreichte die Spannung des Transplantates nur 89% des vorderen Kreuzbandes (Yagi et al.). Bei einem simulierten Pivot-shift-Test mit Valgus (10 Nm) und Innenrotationsmoment (5 Nm) fiel der Unterschied noch deutlicher aus. Unter diesen Bedingungen erreichte die Einzelbündel-Rekonstruktion nur 66% der normalen Spannungen des vorderen Kreuzbandes, die

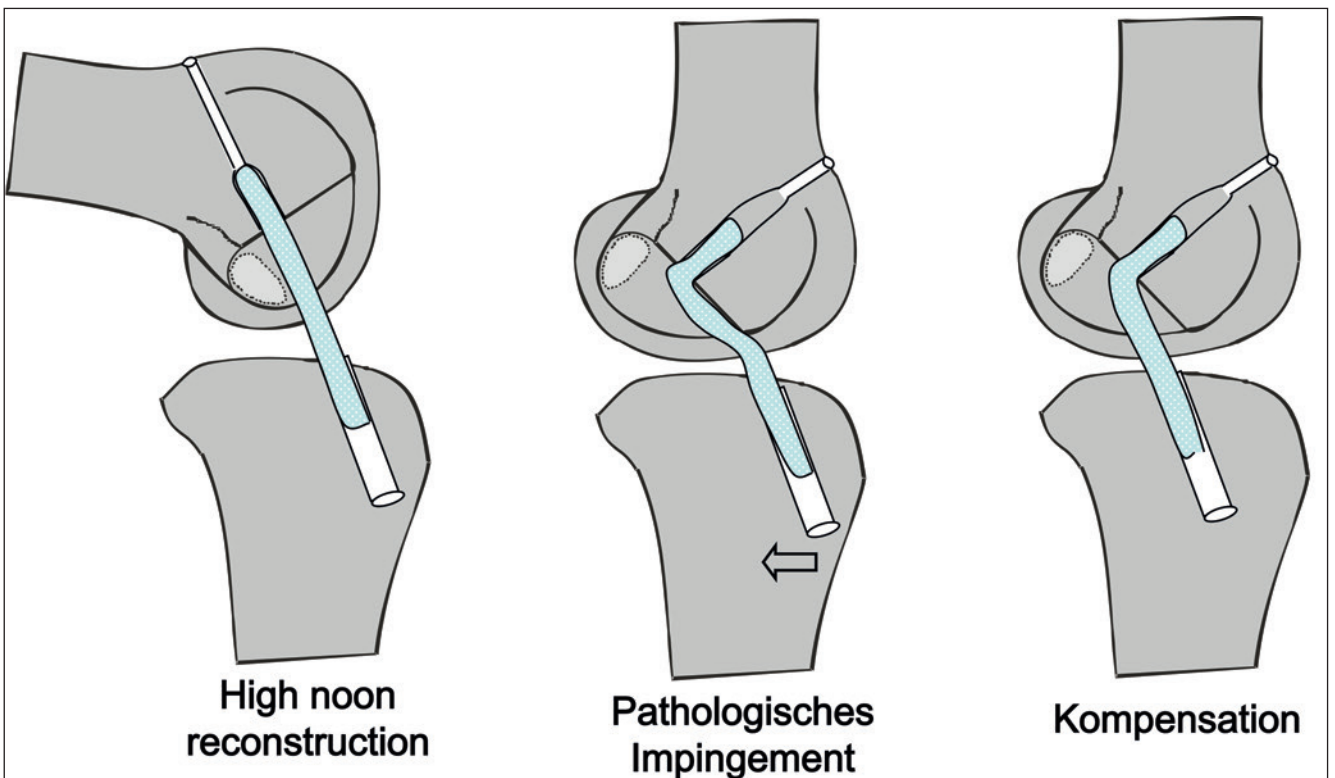


Abbildung 10: Schematische Erläuterung der tibialen Tunnelproblematik bei fehlplatziertem femoralem Tunnel.

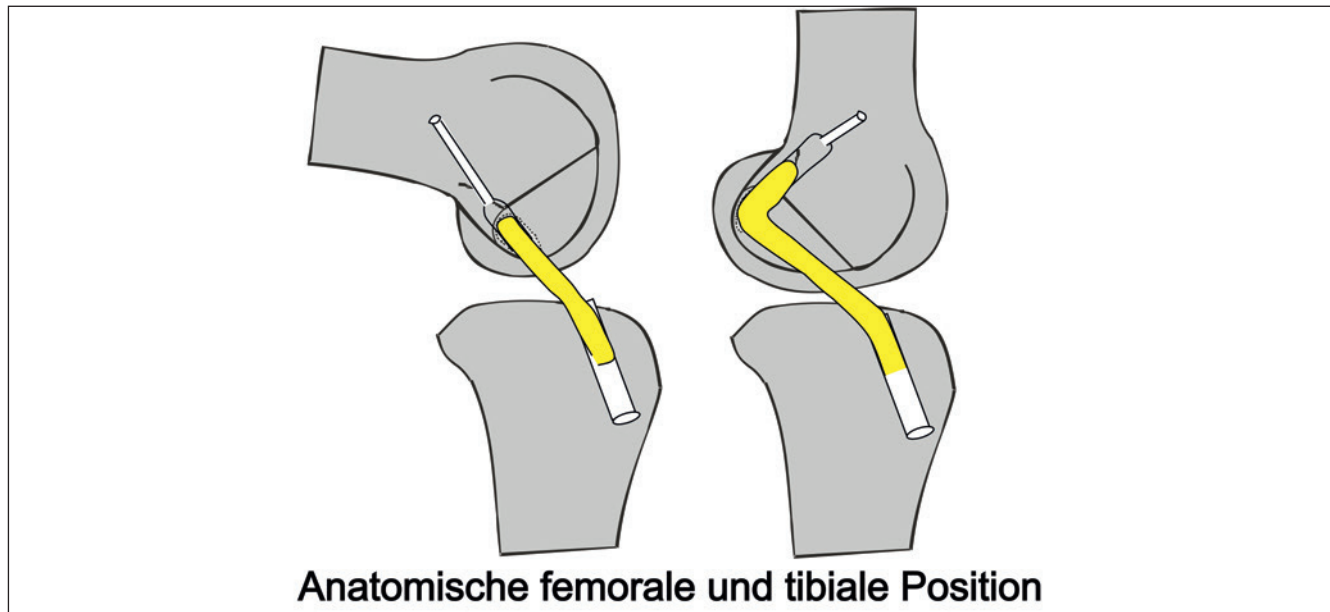


Abbildung 11: Schematische Erläuterung der tibialen Tunnelposition bei anatomischer Tunnellage.

Doppelbündelrekonstruktion erreichte 91%. Auch die Stabilität der mit dem Doppelbündeltransplantat rekonstruierten Kniegelenke kam der intakter Kniegelenke näher als nach einer «Einbündelrekonstruktion». Kritisch muss bei Interpretation dieser Daten jedoch angemerkt werden, dass bei der Einzelbündel-Rekonstruktion eine hohe femorale Tunnelposition verwendet wurde, die dem AM Ursprung entsprach. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen VKB intakten und dem Doppelbündel VKB rekonstruierten Knie in anteriorer tibialer Translation in 0 und 30° Flexion. Auch bei einer Doppelbündel-Rekonstruktion ist die femorale Tunnelposition entscheidend für die resultierende Kinematik (Abb. 9).

Einen weiteren wichtigen Einfluss auf die Kniegelenkinematik kann die Positionierung des tibialen Tunnels aufweisen. Bei der konventionellen Einzelbündel-Rekonstruktion dient vielen Operateuren der vordere Rand des HKB zur Orientierung bei der Anlage des tibialen Tunnels (Morgan 1997). Bei dieser Technik liegt der tibiale Tunnel jedoch im hinteren Anteil der Insertion im Bereich des PL Bündels. Grund für die posteriore Tunnelpositionierung ist meist eine transtibiale Tunneltechnik. Hierbei wird der femorale Tunnel durch einen zuvor angelegten tibialen Tunnel platziert (transtibiale Technik). Um eine femorale anteriore Tunnelfehlpriorisierung zu vermeiden, muss der tibiale Tunnel im tibialen PL Ansatz gewählt werden. Eine weitere Ursache für die posteriore «unanatomische» tibiale Tunnellage ist das sogenannte «impingement syndrom» (Abb. 10). Ein Impingement, also ein Anstossen des VKB an das Dach der interkondylären Notch, ist jedoch physiologisch und ist zu unterscheiden von einem pathologischen Impingement. Ein pathologisches Impingement ist definiert als Bewegungseinschränkung nach VKB-Rekonstruktion, insbesondere ein resultierendes Streckdefizit (Zantop und Petersen 2007). Um eine solche pathologische Bewegungseinschränkung zu vermeiden, wurde von einigen Autoren eine posteriore tibiale Tunnelpositionierung empfohlen. Die Ergebnisse anatomischer Rekonstruktionen mit einer tibialen Tunnelplatzierung im AM Ursprung und einer medialen Portaltechnik femoral lassen jedoch vermuten,

dass das Problem des pathologischen Impingements eher auf der femoralen Seite zu suchen ist und eine posteriore tibiale Tunnelplatzierung nicht notwendig ist. Wird ein Transplantat femoral hoch positioniert (High-noon-Position), verläuft das Transplantat steiler und es kommt eher zu einem Anstossen als bei einem flacheren Transplantatverlauf (Abb. 10). Bei einer anatomischen femoralen Position ist auch eine anatomische tibiale Positionierung möglich, ohne ein pathologisches Impingement zu verursachen (Abb. 11).

Über den Effekt der tibialen Tunnelposition bei Doppelbündel-Rekonstruktion gibt es im Schrifttum nur wenige Angaben. Bisher wurde versucht, den tibialen Tunnel möglichst weit nach hinten zu legen um ein pathologisches Impingement am vorderen Rand der Fossa intercondylaris zu vermeiden. Die Folge ist ein eher steiles Transplantat, das theoretisch weniger AP Stabilität erzeugt als ein weniger steiles Transplantat. Der biomechanische Vergleich von zwei Doppelbündel-Techniken konnte diese Hypothese bestätigen (Petersen et al. 2007). In dieser Studie wurde eine Doppelbündel-Technik mit zwei tibialen Tunneln mit einer Doppelbündel-Technik mit einem tibialen Tunnel mit einem Roboter/KMS-System verglichen. Bei der tibialen Ein-Kanal-Technik lag der tibiale Tunnel in der PL Insertion; bei der Zwei-Kanal-Technik lag der PL Tunnel in der PL Insertion und der AM Tunnel in der AM Insertion. Dadurch war der Verlauf des AM Transplantates in der interkondylären Notch flacher. Sowohl AP Stabilität als auch Rotationsstabilität (10 Nm Valgus und 4 Nm Innenrotation; simulierter Pivot-shift-Test) waren mit der tibialen Zwei-Kanal-Technik besser. Mit dieser Studie konnte erstmals gezeigt werden, dass auch die tibiale Tunnelposition einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität nach VKB-Rekonstruktion hat. Ein weiterer Vorteil der zwei tibialen Tunnel Technik scheint eine selektive Spannung bei der Fixation der beiden Bündel zu sein. In dieser Studie wurde das AM Bündel bei 45° und das PL Bündel bei 15° fixiert, da die Bündel in diesen Flexionsstellungen die höchste Spannung zeigen. Miura et al. untersuchten den Effekt von unterschiedlichen Flexionsgraden bei der Fixation von Doppelbündel VKB-Rekonstruktionen und beschrieben,

dass bei einer gleichzeitigen Fixation der beiden Bündel bei 30° es zu einer Überlastung des PL Bündels kommt. Eine Fixation in 60° Flexion (AM Bündel) und 0° Flexion (PL Bündel) führte hingegen zu einer Überlastung des AM Bündels. In einer nachfolgenden Studie konnte die gleiche Arbeitsgruppe eine Fixation des PL Bündels bei 15° und des AM Bündels bei 45° Knieflexion empfehlen (Vercillo et al. 2007).

Zusammenfassend haben alle zitierten Untersuchungen zur Kniegelenkinematik nach Einzelbündel-VKB-Rekonstruktionen gezeigt, dass die Wiederherstellung der Rotationsstabilität entscheidend von der femoralen Tunnelposition abhängt. Je weiter der Tunnel im femoralen PL Ursprungsgebiet liegt, umso besser die Rotationsstabilität. Klinische Studien haben gezeigt, dass die Sicherung der Rotationsstabilität mit einer reduzierten Arthroserate einhergeht (Jonsson et al. 2004). Die tibiale Tunnelpositionierung sollte aus kinematischer Sicht im anteromedialen Bündelbereich liegen. Ein pathologisches Impingement mit Extensionsdefizit ist nicht mit einer anterioren tibialen Tunnelpositionierung assoziiert, sondern muss als femorale Tunnelfehllage interpretiert werden. Häufig sind hier anteriore und steile Tunnelpositionen, die in einer transtibialen Technik gebohrt wurden. Ähnlich wie bei Einzelbündel-Rekonstruktionen scheinen bei einer Doppelbündel-Rekonstruktion die femorale Tunnelpositionierung und die Flexionsstellung bei Fixation der Bündel eine wichtige Rolle zu spielen. Ein operativer Fehler mit einer nicht anatomischen femoralen Tunnelplatzierung oder Überlastung eines Bündels durch fehlerhafte Spannung kann den biomechanischen Vorteil einer Doppelbündel-Rekonstruktion zunichte machen.

Literaturverzeichnis

- Amis A, Bull AMJ, Lie DT (2005). Biomechanics of Rotational Instability and Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Oper Tech Orthop*; 15: 29–35.
- Amis AA, Dawkins GP (1991). Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fiber bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br* 73: 260–267.
- Amis AA, Jakob RP (1998). Anterior cruciate ligament graft positioning, tensioning and twisting. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*; 6 Suppl 1: 2–12.
- Andersen HN, Dyhre-Poulsen P (1997). The anterior cruciate ligament does play a role in controlling axial rotation in the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*; 5(3): 145–149.
- Andriacchi TP, Briant PL, Beville SL, Koo S (2006). Rotational changes at the knee after ACL injury cause cartilage thinning *Clin Orthop Relat Res*; 442: 39–44.
- Arnold MP, Verdonschott N, van Kampen A (2005). ACL graft can replicate normal ligaments tension curve. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*; 13: 625–631.
- Bach JM, Hull HL, Patterson HA (1997). Direct measurements of strain in the posterolateral bundle of the anterior cruciate ligament. *J Biomech*; 30, 281–283.
- Dandy DJ (1981). *Arthroscopic surgery of the knee*. Churchill Livingstone, Edinburgh London New York,; pp 67–68.
- Daniel DM, Stone ML, Sachs R, Macolm L (1985). Instrumented measurement of anterior knee laxity in patients with acute anterior cruciate ligament disruption. *Am J Sports Med*; 13: 401–407.
- Gabriel MT, Wong EK, Woo SL, Yagi M, Debski RE (2004). Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotary loads. *J Orthop Res*; 22: 85–89.
- Galway HR, MacIntosh DL (1980). The lateral pivot shift: a symptom and sign of anterior cruciate Ligament insufficiency. *Clin Orthop Relat Res*; 4: 45.
- Giffin JR, Stabile KJ, Zantop T, Vogrin TM, Woo SL, Harner CD (2007). Importance of tibial slope for stability of the posterior cruciate ligament deficient knee. *Am J Sports Med*; 35(9): 1443–1449.
- Hamada M, Shino K, Horibe S, Mitsuoka T, Miyama T, Shiozaki T (2001). Single- versus bi-socket anterior cruciate ligament reconstruction using autogenous multiple-stranded hamstring tendons with endobutton femoral fixation: A prospective study. *Arthroscopy* 17: 801–807.
- Howell SM (1998). Principles for placing the tibial tunnel and avoiding roof impingement during reconstruction of a torn anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*; 6 Suppl 1: 49–55.
- Jonsson H, Riklund-Ahlstrom K, Lind J (2004). Positive pivot shift after ACL reconstruction predicts later osteoarthritis: 63 patients followed 5–9 years after surgery. *Acta Orthop Scand*; 75(5): 594–549.
- Kanamori A, Zeminski J, Rudy TW, Li G, Fu FH, Woo SL (2002). The effect of axial tibial torque on the function of the anterior cruciate ligament: a biomechanical study of a simulated Pivot-shift-Test. *Arthroscopy*; 18: 394–398.
- Kocher MS, Steadman JR, Briggs KK, Sterett WI, Hawkins RJ (2004). Relationships between objective assessment of ligament stability and subjective assessment of symptoms and function after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*; 32: 629–634.
- Lenschow S, Zantop T, Weimann A, Lemburg T, Raschke M, Strobel M, Petersen W. Joint kinematics and in situ forces after single-bundle PCL reconstruction: a graft placed at the center of the femoral attachment does not restore normal posterior laxity. *Arch Orthop Trauma Surg* 2006; 126: 253–259.
- Levy AS, Meier SW. Approach to knee cartilage injury in the anterior cruciate ligament deficient. *Orthop Clin N Am*. 2003; 34: 149–67.
- Loh JC, Fukuda Y, Tsuda E, Steadman RJ, Fu FH, Woo SL (2003). Knee stability and graft function following anterior cruciate ligament reconstruction: Comparison between 11 o'clock and 10 o'clock femoral tunnel placement. 2002 Richard O'Connor Award paper. *Arthroscopy* 19(3): 297–304.
- Meunier A, Odensten M, Good L (2007). Long term results after primary repair or non-surgical treatment of ACL rupture: a randomized study with a 15 year follow up. *Scand J Med Sci Sports*; 17: 230–237.
- Miura K, Woo SL, Brinkley R, Fu YC, Noorani S (2006). Effects of knee flexion angles for graft fixation on force distribution in double-bundle anterior cruciate ligament grafts. *Am J Sports Med*; 34: 577–585
- Morgan CD, Kalman VR, Grawl DM (1995). Definitive landmarks for reproducible tibial tunnel placement in anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*; 11: 275–288.
- Musahl V, Plakseychuk A, VanScyoc A, Sasaki T, Debski RE, McMahon PJ, Fu FH (2005). Varying femoral tunnels between the anatomical footprint and isometric positions: effect on kinematics of the anterior cruciate ligament-reconstructed knee. *Am J Sports Med* 33(5): 712–718.
- Petersen W, Lenschow S, Weimann A, Strobel MJ, Raschke MJ, Zantop T (2006). Importance of femoral tunnel placement in double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction: biomechanical analysis using a robotic/universal force-moment sensor testing system. *Am J Sports Med*; 34: 456–463.
- Petersen W, Tretow H, Weimann A, Herbolt M, Raschke M, Zantop T (2007). Biomechanical Evaluation of Two Techniques for Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament reconstruction: One Tibial Tunnel Versus Two Tibial Tunnels. *Am J Sports Med* 35(2): 228–234.
- Petersen W, Zantop T (2007). Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament with Regard to Its Two Bundles. *Clin Orthop Relat Res* 454: 35–47.
- Roos H, Adalberth T, Dahlberg L, Lohmander LS (1995). Osteoarthritis of the knee after injury to the anterior cruciate ligament or meniscus. The influence of time and age. *Osteoarthritis Cartilage*; 3: 261–267.
- Rudy TW, Livesay GA, Xerogeanes JW, Woo SLY (1994). A combined robotics/UFS approach to measure knee kinematics and determine in-situ ACL forces. *ASME Adv Bioeng*; 28: 287–288.
- Sakane M, Fox RJ, Woo SL, Livesay GA, Li G, Fu FH (1997). In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *J Orthop Res*; 15(2): 285–293.
- Tashman S, Collon D, Anderson K, Kolowich P, Anderst W (2004). Abnormal Rotational Knee Motion During Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med*; 32: 974–983.
- Vercillo F, Woo SL, Noorani SY, Dede O (2007). Determination of a safe range of knee flexion angles for fixation of the grafts in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a human cadaveric study. *Am J Sports Med* 35(9): 1513–1520
- Woo SL, Kanamori A, Zeminski J, Yagi M, Papageorgiou C, Fu FH (2002). The effectiveness of reconstruction of the anterior cruciate ligament with hamstrings and patellar tendon. A cadaveric study comparing anterior tibial and rotational loads. *J Bone Joint Surg Am*; 84: 907–914.

34. Yagi M, Kuroda R, Nagamune K, Yoshiya S, Kurosaka M (2007). Double-bundle ACL Reconstruction Can Improve Rotational Stability. *Clin Orthop Rel Res*; 454: 100–107.
35. Yagi M, Wong EK, Kanamori A, Debski RE, Fu FH, Woo SL (2002). Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*; 30: 660–666.
36. Zantop T, Diermann N, Schumacher T, Schanz S, Fu FH, Petersen W (2008). Anatomical and Non-anatomical Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Importance of Femoral Tunnel Location on Knee Kinematics. *Am J Sports Med*. 2008 Feb 22
37. Zantop T, Herbort M, Raschke MJ, Fu FH, Petersen W (2007). The Role of the Anteromedial and Posterolateral Bundles of the Anterior Cruciate Ligament in Anterior Tibial Translation and Internal Rotation. *Am J Sports Med.*; 35(2): 223–227.
38. Zantop T, Herbort M, Raschke MJ, Fu FH, Petersen W. ACL mismatch reconstruction: Influence of different tunnel placement strategies in single bundle ACL reconstructions on the knee kinematics. *Arthroscopy eingereicht*.
39. Zantop T, Petersen W, Sekiya JK, Musahl V, Fu FH (2006). Anterior cruciate ligament anatomy and function relating to anatomical reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.*; 14: 982–992.
40. Zantop T, Petersen W (2007). Anatomische Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. *Arthroscopie*; 20: 94–104.
41. Zantop T, Schumacher T, Diermann N, Schanz S, Raschke MJ, Petersen W (2007). Anterolateral rotational knee instability: role of posterolateral structures. *Arch Orthop Trauma Surg* 127(9): 743–752.
42. Zantop T, Wellmann M, Fu FH, Petersen W (2008). Tunnel Positioning of Anteromedial and Posterolateral Bundles in Anatomic Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Anatomic and Radiographic Findings. *Am J Sports Med* 36(1): 65–72.
43. Zantop et al. (2012). VKB Expertenmeeting. GOTS, Elsevier Verlag.