

Aus dem CharitéCentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie  
Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)  
Ärztlicher Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka  
Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Ulrich Stöckle

## **Habilitationsschrift**

# **Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität**

zur Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach  
Orthopädie und Unfallchirurgie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

**Dr. med. Clemens Gwinner**  
**geboren in Bremen**

Eingereicht: Juli 2022

Dekan: Prof. Dr. Axel R. Pries

1. Gutachter: Prof. Dr. Georgi Wassilew, Greifswald

2. Gutachter: Prof. Dr. Patrick Sadoghi, Graz

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anatomie des Kniegelenkes.....	1
1.2 Die dorsale Reklination des Tibiaplateaus (tibialer Slope) .....	4
1.3 Klinische Bedeutung des tibialen Slopes .....	5
1.4 Ziel der Habilitationsschrift .....	6
<b>2. Ergebnisse</b> .....	<b>12</b>
2.1 Die Messung des tibialen Slopes in Abhängigkeit der bildgebenden Modalität (Arbeit 1).....	12
2.2 Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität im gesunden Kniegelenk (Arbeit 2) .....	21
2.3 Einfluss des tibialen Slopes auf das Transplantatversagen nach VKB Rekonstruktion (Arbeit 3) .....	30
2.4 Einfluss des tibialen Slopes auf das Langzeitergebnis nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes (Arbeit 4).....	39
2.5 Einfluss des tibialen Slopes auf den zeitlichen Verlauf der PTT nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes (Arbeit 5).....	48
2.6 Einfluss des tibialen Slopes auf die Entwicklung von degenerativen Gelenkveränderungen nach HKB Rekonstruktion (Arbeit 6) .....	58
2.7 Operative Korrekturmöglichkeiten zur Erhöhung des tibialen Slopes (Arbeit 7) .....	69
<b>3. Diskussion</b> .....	<b>78</b>
3.1 Einfluss des tibialen Slope auf die sagittale Kniegelenksstabilität im unverletzten Kniegelenk .....	79
3.2 Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität nach Kreuzbandrekonstruktion .....	82
<b>4. Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>85</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>89</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ATT	anteriore tibiale Translation
CT	Computertomografie
HKB	hinteres Kreuzband
HTO	hohe tibiale Osteotomie
MPTA	medialer proximaler Tibiawinkel
MRT	Magnetresonanztomografie
PTT	posteriore tibiale Translation
TS	tibialer Slope
VKB	vorderes Kreuzband
WORMS	whole-organ magnetic resonance imaging score

# 1. Einleitung

## 1.1 Anatomie des Kniegelenkes

Das menschliche Kniegelenk hat weit weniger an der Evolution teilgenommen als Hand oder Gehirn. Trotz alledem hat es – als integraler Bestandteil des aufrechten Ganges – den Menschen befähigt, manuelle Geschicklichkeit von ungestörter Fortbewegung zu separieren und so im Verbund mit dem Denken und der Sprache die geistige Hegemonie ermöglicht. Evolutionär bedeutet die habituelle Bipedie aber auch, dass der Mensch bedeutend langsamer, unbeweglicher und ungeschickter wurde. Die statischen Anforderungen wurden folglich auf zwei Extremitäten konzentriert, die durch den femoralen Valgus unter dem Körperschwerpunkt zusammengeführt wurden. Konsekutiv hat die Belastung zugenommen und der Integrität der stabilisierenden Strukturen kommt eine weitaus größere Bedeutung zu. Seitdem „steigt der Mensch auf gefährlichen Wegen in die höchsten Gebirge, um über seine Ängstlichkeit und seine schlotternden Knie Hohn zu lachen (Friedrich Wilhelm Nietzsche)“.

Das Kniegelenk durchläuft durchschnittlich 1.000.000 Belastungen im Jahr und muss schon bei Alltagsaktivitäten einer Krafteinwirkung von ca. 300 Kilogramm widerstehen. Ein Merkmal, welches den bipeden Menschen von vierfüßigen Tieren unterscheidet, ist die Fähigkeit, das Kniegelenk auf  $0^\circ$  zu extendieren bzw. zu hyperextendieren (1, 2). In dieser strecknahen Position muss das Kniegelenk ligamentär als auch muskulär stabil geführt werden, um eine sichere Standbeinphase zu ermöglichen. Zusätzlich ist in Beugung eine Rotation erforderlich, um dem Fuß den nötigen Verkehrsraum zu gewährleisten. Aus diesem konträren Anforderungsprofil ist evolutionär ein komplexes Gelenk entstanden, welches Scharnier- und Rotationsbewegungen vereint (3). Das Ausmaß dieser Bewegungen wird durch die aktiven Kräfte der umliegenden Muskulatur bestimmt und durch die passiven Strukturen – wie Kreuz- und Kollateralbänder bzw. die knöchernen Gelenkpartner – begrenzt. Die funktionelle Stabilität wird somit durch ein Zusammenspiel der aktiven und passiven Strukturen unter statischen wie dynamischen Bedingungen gewährleistet, welches folglich durch die Verletzung einzelner Strukturen nachhaltig gestört werden kann.

Über Jahrzehnte haben ligamentäre Verletzungen des Kniegelenkes die wissenschaftliche Diskussion dominiert. Aufbauend auf die erste anatomische

Beschreibung der „ligamenta genu cruciata“ durch Claudius Galen von Pergamon (199-129 v.Chr.) und ihre biomechanische Einordnung durch die Gebrüder Weber im Jahr 1836 sind das vordere (VKB) und hintere Kreuzband (HKB) vielfach dezidiert beschrieben worden. Ihre Insertionsanatomie, funktionelle Bündeleinteilung und nicht zuletzt ihre Wichtigkeit als zentraler Pfeiler für die sagittale Kniegelenksstabilität sind weitestgehend akzeptiert.

Das intrakapsulär und extrasynovial gelegene VKB verläuft von seinem oval-förmigen Ursprung an der medialen Wand der lateralen Femurkondyle zu seinem c-förmigen Ansatz am Tuberculum intercondylare (4). Auf den ersten Blick erscheint das VKB im Querschnitt oval, bei genauerer Betrachtung erkennt man aber eine schleifenartige Form, dessen durchschnittliche Breite von 11 mm an den ossären Verankerungsstellen auf die mehr als 3,5-fache Fläche auffächert (5-7). Aus histologischer Sicht findet man vor der knöchernen Verankerung noch eine chondrale Übergangszone, was für Insertionsbereiche mit hoher Zugbelastung typisch ist (5). Mittlerweile wird das VKB in ein längeres anteromediales und ein kürzeres posterolaterales Bündel unterteilt, wobei die tibiale Insertion namensgebend ist (8). Beide Bündel scheinen bei jedem Beugegrad unter Spannung zu stehen, zur Stabilität tragen sie aber überwiegend im Moment ihrer größten Zugspannung bei. Dies ist bei Beugegraden zwischen 30 und 90° erreicht, in denen sie knapp 90% der anterioren tibialen Translation (ATT) begrenzen. Bedingt durch den schrägen intraartikulären Verlauf des VKBs, ist es neben der sagittalen Kniegelenkstabilität auch für die Rotationsstabilität wichtig. Da es sich jedoch unweit des Rotationszentrums befindet und somit lediglich einen kurzen Hebelarm aufweist, spielt das VKB hierfür allenfalls eine untergeordnete Rolle. Die typische anterolaterale Rotationsinstabilität wird vielmehr dadurch bedingt, dass sich bei einer Verletzung des VKBs das Rotationszentrum nach medial verlagert und das nun zentrumferne laterale Kompartiment bei Rotationsbewegungen längere Strecken zurücklegt (9).

Im Verletzungsfall kommt es durch die überschießende ATT und die Verlagerung des Rotationszentrums in letzter Konsequenz zu einer übermäßigen Beanspruchung der benachbarten meniskalen und chondralen Strukturen. Vor diesem Hintergrund wird bei vielen Patienten die operative Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes empfohlen, um eine weitestgehende Restitution der physiologischen

Kniegelenkskinematik zu erreichen und bei Wiederaufnahme von sportlicher bzw. beruflicher Aktivität einer frühzeitigen Gelenkdegeneration entgegenzuwirken.

Nachdem im Jahr 1939 die Verwendung der Patellasehne von Campbell und die Verwendung von Hamstringsehnen von Macey als Kreuzbandersatz vorgestellt wurden, sind die zwischenzeitlich ideologisch geprägten Diskussionen zur Transplantatwahl weitestgehend verlassen worden und es wurden anatomische, minimalinvasive Rekonstruktionsverfahren etabliert (10, 11). Operationstechnische Fortschritte haben in den letzten Jahrzehnten wesentlich dazu beigetragen, dass einerseits klinische Ergebnisse kontinuierlich verbessert und andererseits die Rate an Transplantatinsuffizienzen gesenkt werden konnten.

Das benachbarte hintere Kreuzband ist ebenfalls in der Fossa intercondylaris lokalisiert und fristet – nicht nur anatomisch, sondern auch wissenschaftlich gesehen – ein Schattendasein gegenüber seinem vorderen Konterpart. Es verläuft fächerförmig von der Innenseite der medialen Femurkondyle zum posterioren Anteil der Area intercondylaris, ca. 10 mm unterhalb des Tibiaplateaus und makroskopisch lässt sich ein kräftiges anterolaterales von einem deutlich schwächeren posteromedialen Bündel abgrenzen (12). Auch wenn keine histologischen Unterschiede bestehen, übersteigt die Reißfestigkeit des anterolateralen Bündels die des posteromedialen Bündels um ein Vielfaches. Aus biomechanischer Sicht begrenzt es vorrangig die posteriore tibiale Translation (PTT) in höheren Beugegraden (13). Hervorzuheben ist, dass die posteriore Stabilität des Kniegelenkes neben dem HKB durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Strukturen gewährleistet wird, die allgemein als posterolaterale Gelenkecke zusammengefasst werden. Während isolierte HKB Verletzungen häufig konservativ behandelt werden können, besteht bei einem Großteil aller operationspflichtigen Rupturen eine begleitende Verletzung dieser posterolateralen Gelenkecke. Die operative Therapie dieser Verletzungen ist technisch anspruchsvoller und geht mit weniger reproduzierbaren klinischen Ergebnissen einher als die Versorgung des vorderen Kreuzbandes (14). Analog haben sich aber auch hier anatomische, minimalinvasive Operationsmethoden mittels autologer Sehnentransplantate durchgesetzt, wobei aktuell noch Uneinigkeit besteht, ob hierbei als Einzelbündel insbesondere das anterolaterale Bündel rekonstruiert wird oder eine Doppelbündelrekonstruktion erfolgen sollte.

Bezogen auf beide Kreuzbänder postulierte der Lyoner Chirurg Amédée Bonnin bereits 1845, dass „Rupturen der Ligamente viel häufiger sind als allgemein angenommen“ (15). Analog dazu zeigt sich leider auch, dass die Rate an versagten Kreuzbandrekonstruktionen lange unterschätzt wurde (16). Dies ist in Anbetracht einer verfrühten Gelenkdegeneration und der deutlich schlechteren klinischen Resultate nach Revisionsoperationen besorgniserregend (17, 18). Nachdem lange Zeit operationstechnische Unterschiede hierfür verantwortlich gemacht wurden, rücken in letzter Zeit zunehmend patientenindividuelle Faktoren in den Vordergrund.

## **1.2 Die dorsale Reklination des Tibiaplateaus (tibialer Slope)**

Ungezählte Publikationen sind Ausdruck dafür, dass sich das wissenschaftliche Augenmerk bisher weitestgehend auf die Kreuzbänder fokussiert hat, während die benachbarten knöchernen Gelenkpartner negiert wurden. Insbesondere die komplexe Anatomie der proximalen Tibia scheint jedoch die sagittale Translation der Tibia vorzugeben, welche konsekutiv durch primäre und sekundäre Stabilisatoren – wie das vordere und hintere Kreuzband – kompensiert werden muss. Anatomisch ist in diesem Zusammenhang die dorsale Reklination des Tibiaplateaus hervorzuheben, die als tibialer Slope (TS) bezeichnet wird und als Winkel zwischen einer zur Tibiaschaftachse orthogonal verlaufenden Linie und der dorsalen Inklination des Tibiaplateaus definiert ist (19). Dieser Winkel ist individuell unterschiedlich und reicht je nach Studie von  $-9^{\circ}$  bis  $16^{\circ}$ , mit einem Durchschnitt von circa  $3-10^{\circ}$  (20, 21). Ein negativer Winkel des tibialen Slopes impliziert eine Neigung nach anterior, während ein positiver Wert eine Neigung des Tibiaplateaus nach posterior anzeigt. Dabei scheinen signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern (weiblich > männlich), der ethnischen Zugehörigkeit (asiatisch > afrikanisch > kaukasisch) und den beiden Kniegelenkskompartimenten (medial > lateral) zu bestehen (21).

Diese hohe Intervariabilität lässt vermuten, dass die Annahme eines uniformen tibialen Slopes im Fall einer Kreuzbandverletzung nicht zum individuell besten operativen Ergebnis führen wird. Entgegen der aktuellen wissenschaftlichen Beachtung findet der tibiale Slope jedoch bisher wenig Berücksichtigung in der klinischen Routine von primären oder Revisionsoperationen der Kreuzbänder.

### 1.3 Klinische Bedeutung des tibialen Slopes

Im nativen Kniegelenk kommt es beim Übergang von Streckung zu Beugung zu einem Vorwärtsgleiten des Tibiaplateaus im Sinne einer anterioren tibialen Translation und einer Verlagerung des tibiofemorale Kontaktpunktes nach posterior. Der tibiale Slope beeinflusst diese physiologische sagittale Translationsbewegung nachhaltig. Vereinfacht betrachtet, führt ein höherer tibialer Slope zu einer Erleichterung der ATT. Im VKB intakten Kniegelenk kommt es somit zu einer Mehrbelastung des vorderen Kreuzbandes, welches diese vermehrte ATT begrenzen muss. Konsekutiv kommt es im VKB defizienten Kniegelenk und einem hohen tibialen Slope zu einer überschießenden ATT. In diesem Zusammenhang hat die Arbeit von Dejour und Bonnin den Grundstein für unser heutiges Verständnis gelegt, indem die Autoren zeigen konnten, dass im VKB defizienten Kniegelenk die ATT um 6 mm zunimmt, wenn der tibiale Slope um  $10^\circ$  gesteigert wird (22). 2004 konnten zwei unabhängige Arbeitsgruppen aus Deutschland und den USA demonstrieren, dass Änderungen des tibialen Slopes auch im gesunden Kniegelenk die tibiale Translation beeinflussen (23, 24). Agneskirchner und Lobenhoffer beschrieben, dass bei Erhöhung des tibialen Slopes die ATT zunimmt. Zudem konnten sie zeigen, dass eine Erhöhung – im HKB defizienten Kniegelenk – einer PTT entgegenwirkt (23). Giffin et al. validierten diese Ergebnisse für verschiedene Beugegrade. In voller Extension kam es nach Erhöhung des tibialen Slopes um  $4^\circ$  zu einer vermehrten ATT von 4 mm und bei  $120^\circ$  Beugung um immerhin noch 2 mm (24).

In einem Computermodell simulierten Shelburne et al. zusätzlich den Einfluss der knieumgreifenden Muskulatur. Beim Gehen, Stehen und Kniebeugen konnten sie eine direkte Proportionalität zwischen einer Erhöhung des tibialen Slopes, einer Zunahme der ATT und Zunahme der Zugspannung auf das VKB darstellen. Dabei führte eine Erhöhung um  $5^\circ$  zu einer Zunahme der ATT von 2 mm. Im klinischen Kontext bedeutet dies schon bei Alltagsaktivitäten, wie einfachem Gehen, eine Zunahme der Zugspannung des VKBs um 26% (25).

Setzt man zusätzlich einen Unterschied zwischen dem tibialen Slope des medialen und lateralen Tibiaplateaus voraus, wird dies zusätzlich die tibiofemorale Rotation beeinflussen. Bei einem steileren lateralen Slope gleitet die laterale Femurkodyle nach posterior, während das Drehzentrum im medialen Kompartiment verbleibt. Dies führt zu einer femoralen Außenrotation, respektive tibialen Innenrotation, was einem Pivot-



Shift-Mechanismus entspricht. Dieser Effekt würde im Fall einer Insuffizienz des VKBs die bereits beschriebene anterolaterale Rotationsinstabilität potenzieren (26). Analog zum vorderen Kreuzband konnten verschiedene Autoren diese Ergebnisse auf das HKB übertragen und zeigen, dass ein flacher tibialer Slope zu einer erhöhten PTT und somit zu erhöhten Zugkräften auf das HKB führt (24, 27).

Einer jeden Kreuzbandrekonstruktion ist gemein, dass ein nicht vaskularisiertes Sehnentransplantat in ein bradytrophes Milieu eingebracht wird, bevor es nach einer avaskulären Nekrose und nachfolgenden Inflammation eine erneute Revaskularisierung erfährt, in der Ligamentisierungsphase sukzessiv remodelliert und sich langsam den mechanischen und histologischen Eigenschaften der nativen Kreuzbänder annähert. Dieser Prozess dauert in der Regel über Jahre an. Am stärksten wird eine erfolgreiche Revaskularisation von einer zu hohen Transplantatspannung beeinträchtigt (28). Aufgrund des bereits erwähnten linearen Zusammenhangs zwischen einem erhöhten tibialen Slopes und einer erhöhten Zugkraft auf das VKB bzw. einem flachem tibialen Slope und einer erhöhten Zugkraft auf das HKB ist es wenig verwunderlich, dass zahlreiche Arbeiten – neben der Bedeutung des tibialen Slopes für Kreuzbandverletzungen – auch einen Zusammenhang mit Transplantatversagen vermuten (29-33).

#### **1.4 Ziel der Habilitationsschrift**

„In der Kniechirurgie ist die Anatomie der Schlüssel zum Erfolg“ (34). Dass dieser von Hughston formulierte Grundsatz bis heute seine Gültigkeit hat, zeigt die aktuelle Diskussion über die Bedeutung des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität und darauf aufbauend, entstanden die vorliegenden Arbeiten. Dabei stand im Vordergrund, den Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Stabilität im nativen und operierten Kniegelenk zu vertiefen.

Allen wissenschaftlichen Näherungen ist gemein, dass eine valide und reproduzierbare Methodik benötigt wird – im vorliegenden Fall also, um den tibialen Slope zu messen. Insbesondere bei der Verwendung von nativen Röntgenbildern muss bedacht werden, dass es sich lediglich um eine zweidimensionale Annäherung einer komplexen dreidimensionalen Oberfläche handelt. Zudem sind in der klinischen Routine – aufgrund besserer Verfügbarkeit und niedrigerer effektiven Strahlendosis –

häufig nur kurze Röntgenbilder des Kniegelenkes vorhanden. Dem gegenüber stehen schnittbildgebende Verfahren, wie die Computertomografie (CT) oder die Magnetresonanztomografie (MRT), die aktuell als Goldstandard angesehen werden. Die damit verbundene schlechtere Verfügbarkeit, Notwendigkeit spezieller Bildbearbeitungssoftware, höherer Zeitaufwand und deutlich größere Kosten müssen abgewogen werden. Um sich dieser Diskrepanz anzunähern, wurden im Rahmen der Habilitationsschrift zunächst folgende Fragestellungen wissenschaftlich untersucht (**Arbeit 1**):

- Bestehen Unterschiede in der Messung des tibialen Slope zwischen zwei nativradiologischen Akquisitionstypen und dem MRT als Goldstandard?
- Gibt es Qualitätskriterien bei nativen Röntgenbildern, anhand derer die Reproduzierbarkeit von Messungen des tibialen Slopes verbessert werden können?

Nach aktuellem Kenntnisstand geht man davon aus, dass der tibiale Slope von Geburt an einem konstanten Wandel unterworfen ist. Die Kreuzbänder entwickeln sich embryologisch gesehen aus ortsständigem Synovialmesenchym zwischen Femur- und Tibiaanlage (35). In der späten Embryonalperiode sind die Fibroblasten bereits in Zugrichtung der Kreuzbänder ausgerichtet. Es wird vermutet, dass die tibiofemorale Artikulation von Anfang an unter Führung der Kreuzbänder erfolgt und diese die Form der Femurkondylen und der proximalen Tibia ausbilden. Während der tibiale Slope beim Kind bis zu 17° beträgt, sinkt er bis zur skeletalen Reife auf ca. 7° (21). Dabei scheint die letztendliche Ausprägung wahrscheinlich von der axialen Druckbelastung und dem tibiofemorale Kontaktpunkt abzuhängen. Martin et al. konnten zudem bei Heranwachsenden mit offenen Wachstumsfugen zeigen, dass der laterale TS bei begleitender VKB-Verletzungen zum Zeitpunkt der skeletalen Reife signifikant höhere Werte aufwies als auf der unverletzten Gegenseite (36). Hierfür wurde die vermehrte ATT im verletzten Kniegelenk und die daraus resultierende, vermehrte Druckbelastung auf dem posterioren Tibiaplateau verantwortlich gemacht. Diese Ergebnisse zeigen sehr schön, dass der tibiale Slope nicht nur die ATT bedingt, sondern die ATT auch den tibialen Slope. Diese Zusammenhänge wurden bisher lediglich für die ATT und das VKB hergestellt. Vor diesem Hintergrund soll in der

vorliegenden Habilitationsschrift folgende Fragestellungen untersucht werden (**Arbeit 2**):

- Gibt es einen physiologischen Zusammenhang zwischen dem tibialen Slope und der posterioren tibialen Translation im gesunden Kniegelenk?
- Hat das Alter oder das Geschlecht einen zusätzlichen Einfluss?

Wenn man den Einfluss des tibialen Slopes auf die physiologische Kniegelenksstabilität anerkennt, muss man ihn auch bei Vorliegen einer Kreuzbandrekonstruktion voraussetzen. Dies könnte erklären – trotz Innovationen in der operativen Versorgung von VKB Rupturen und kurzfristig immer besseren klinischen Ergebnissen – warum die Inzidenz von Transplantatinsuffizienzen im Mittel- und Langzeitverlauf deutlich höher ist als bisher angenommen (16). Bisher wird angenommen, dass diese einer multifaktoriellen Genese – Begleitverletzungen, falsche Bohrkanalanlage, Transplantatwahl, -stärke, -größe oder -spannung – unterliegen (37). Anders als diese modifizierbaren Risikofaktoren stellt der tibiale Slope aufgrund der weitestgehend fehlenden Beachtung jedoch einen nicht modifizierten Risikofaktor für eine wiederholte Transplantatinsuffizienz in der Revisionschirurgie des vorderen Kreuzbandes dar. Dies spiegelt sich auch in der aktuellen Literatur wieder, in der nur vereinzelte Studien mit kleinen Fallzahlen über den Stellenwert des tibialen Slopes bei einfach versagter VKB-Rekonstruktion und noch weniger bei mehrfach versagter VKB-Rekonstruktionen berichten. Deshalb sollen folgende Fragestellungen bearbeitet werden (**Arbeit 3**):

- Unterscheidet sich der tibiale Slope bei Patienten mit einfach versagten VKB-Rekonstruktionen und mehrfach versagten VKB Rekonstruktionen?
- Welches Risiko stellt ein hoher tibialer Slope für das Versagen einer VKB-Rekonstruktion dar?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem tibialen Slope und dem Alter bei initialer VKB Ruptur?
- Hat der tibiale Slope einen Einfluss auf die Überlebensdauer des VKB-Transplantates?

Wie bereits angemerkt, finden sich deutlich weniger Studien über das operative Ergebnis nach HKB-Rekonstruktion. Analog zum VKB werden die klinischen

Ergebnisse im Langzeitverlauf aber deutlich schlechter (38). Da der Zusammenhang zwischen einem flachen tibialen Slope und einer vermehrten Belastung des HKBs biomechanisch bestätigt werden konnte, ist auch eine vermehrte Belastung eines HKB-Transplantates anzunehmen (**Arbeit 4**):

- Korreliert ein niedriger tibiale Slope mit einer vermehrten residuellen posterioren Translation nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes?
- Hat eine begleitende Verletzung und Rekonstruktion des VKB bzw. der posterolateralen Gelenkecke einen zusätzlichen Einfluss auf die residuelle posteriore Translation nach HKB Rekonstruktion?

Anhand biomechanischer Studien lässt sich zeigen, dass die aktuellen Operationstechniken des hinteren Kreuzbandes eine hintere Instabilität erfolgreich adressieren können. Wie bereits dargestellt, können klinische Studien mit einem längeren Nachuntersuchungszeitraum dieses jedoch nur bedingt bestätigen. Hier zeigen zahlreiche Studien, dass eine residuelle posteriore Translation im Langzeitverlauf verbleibt (39-41). In diesem Zusammenhang stellen sich somit folgende Fragestellungen (**Arbeit 5**):

- Verändert sich die verbleibende residuelle posteriore Translation im Langzeitverlauf nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes?
- Hat der tibiale Slope einen Einfluss auf den Progress der residuellen posterioren Translation?
- Gibt es hierfür weitere Risikofaktoren wie beispielsweise Alter, Geschlecht, BMI oder ligamentäre Begleitverletzungen?

Wie bereits einführend erläutert, scheint die Funktionalität des hinteren Kreuzbandes essentiell für eine weitestgehend physiologische Gelenkkinematik zu sein. Bei Patienten mit einer funktionellen HKB Insuffizienz wird – infolge einer fehlgeschlagenen konservativen oder operativen Therapie – in einem hohen Prozentsatz von persistierenden Instabilitätsgefühlen, patellofemorale Schmerzen und frühen degenerativen Veränderung berichtet. Auch wenn die Entstehung dieser degenerativen Veränderungen nicht abschließend geklärt zu sein scheint, werden sie vorwiegend mit dem initialen Trauma und einer persistierenden Instabilität in

Verbindung gebracht. Wenn man einen Einfluss des tibialen Slopes auf die persistierende Instabilität nach operativer Therapie voraussetzt, kann der tibiale Slope potentiell auch einen Einfluss auf die Entwicklung einer posttraumatischen Gonarthrose haben. Diese degenerativen Veränderungen können mittlerweile durch moderne MRT-Sequenzen frühzeitig sichtbar gemacht werden und mittels verschiedener semiquantitativer Scores beschrieben werden. Folglich sollen folgende Fragen beantwortet werden (**Arbeit 6**):

- Treten degenerativen Veränderungen im Langzeitverlauf nach HKB-Rekonstruktion auf und wo sind sie lokalisiert?
- Zeigen sich stärkere degenerative Veränderungen bei einer vermehrten postoperativen posterioren Translation?
- Hat der tibiale Slope einen Einfluss auf die Entstehung von degenerativen Gelenkveränderungen?

Wie bereits angesprochen, findet der tibialen Slopes bisher wenig Erwähnung in Therapiealgorithmen zur Behandlung von Kreuzbandverletzungen und stellt damit einen nicht-modifizierbaren Risikofaktor für ein Therapieversagen dar. Dem steht eine wachsende Anzahl von Kadaver- und biomechanischen Studien gegenüber, dass Modifikationen des tibialen Slopes – über eine tibiale Osteotomie – zu einer signifikanten Reduktion der Zugbelastung des betroffenen Kreuzbandes führen können (23, 24).

Auf das hintere Kreuzband bezogen wurden jedoch lediglich vereinzelte Übersichtsartikel und einigen klinische Berichte veröffentlicht, die eine kombinierte koronare und sagittale Korrektur durch eine Osteotomie der Tibia bei beginnender medialer Gonarthrose als Folge einer chronischen HKB Insuffizienz oder bei Varusfehlstellung und posterolateraler Instabilität empfehlen (42-44). Bereits 1999 propagierte Philipp Lobenhoffer die Bedeutung einer zusätzlichen Slopeerhöhung durch eine valgusierende hohe tibiale Osteotomie (HTO) bei chronischer HKB-Insuffizienz (45). Aufbauend auf diese Arbeit berichteten Reichwein und Nebelung 2007 erstmals in einer Patientenserie über die Slopeerhöhung in Kombination mit einer valgusierenden HTO nach Versagen einer HKB-Rekonstruktion (46). Eine alleinige, sagittale Korrektur eines niedrigen tibialen Slopes durch eine anteriore open-

wedge Osteotomie wurde jedoch bisher nicht beschrieben. Deshalb wurden im Rahmen der Habilitationsschrift folgende Aspekte behandelt (**Arbeit 7**):

- Beschreibung unterschiedlicher tibialer Flexionsosteomien und Einordnung in einen historischen Kontext.
- Die Beschreibung einer isolierten, anterioren open-wedge Osteotomie zur Behandlung von Patienten mit einer Insuffizienz des hinteren Kreuzbandes und einem begleitenden niedrigen tibialen Slopes.
- Präsentation von ersten Ergebnissen dieses neuen Operationsverfahrens.

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Die Messung des tibialen Slopes in Abhängigkeit der bildgebenden Modalität (Arbeit 1)

Assessment of the tibial slope is highly dependent on the type and accuracy of the preceding acquisition.

**Gwinner C**, Fuchs M, Sentuerk U, Perka CF, Walter TC, Schatka I, Rogasch JMM.

Arch Orthop Trauma Surg. 2019 Dec;139(12):1691-1697.

<https://doi.org/10.1007/s00402-019-03201-y>

Wie bereits angeführt ist es essentiell, eine valide und reproduzierbare Methodik zur Bestimmung des tibialen Slopes zu haben, um Ergebnisse erheben, beurteilen, vergleichen zu können und letztendlich einen wissenschaftlichen Diskurs zu führen. Bei jeglicher Messung handelt es sich um eine Näherung an die komplexe, dreidimensionale Kontur des Tibiaplateaus. Während man mit schnittbildgebenden Verfahren zumindest die Möglichkeit hat, zwischen dem medialen und lateralen Tibiaplateau zu diskriminieren, sind in der klinischen Routine häufig lediglich kurze, seitliche Röntgenaufnahmen des Kniegelenks vorhanden. Auf seitlichen Röntgenbildern überlagern sich das mediale und laterale Tibiaplateau, was Messfehler begünstigen kann. Der tibiale Slope ist bekanntermaßen definiert als Winkel zwischen einer zur Tibiaschaftachse orthogonal verlaufenden Linie und der dorsalen Inklination des Tibiaplateau. Da die konkave mediale Gelenkfläche in seitlichen Röntgenbildern besser abzugrenzen ist, wird diese in der Messung des TS vorrangig verwendet. Um eine präzise Bestimmung zu ermöglichen, ist neben der Bestimmung der medialen Gelenkkontur auch die korrekte Bestimmung der tibialen Schaftachse. Hier wurden verschiedene Methoden vorgestellt, welche sich jedoch im direkten Vergleich bis zu 5° voneinander unterscheiden, insbesondere wenn das Kniegelenk malrotiert oder die abgebildete Schaftachse zu kurz erscheint.

In der vorliegenden Arbeit konnten wir zeigen, dass die tibiale Schaftachse mindestens 125 mm und die Divergenz der femoralen Kondylen  $<5$  mm betragen sollte, um eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen zu erreichen. Dabei wurde die Methode von Henri Dejour und Michel Bonnin (22) verwendet, die sich durch eine hohe klinische Praktikabilität auszeichnet. Bei Anwendung dieser einfachen Qualitätskriterien kann somit die Qualität der TS Messungen in der klinischen Routine deutlich verbessert werden.

Erfreulicherweise zeigte sich zwar einerseits eine gute Korrelation zwischen der Messung im MRT und den nativradiologischen Messungen. Andererseits zeigte sich aber, dass der tibiale Slope im MRT etwa  $4-5^\circ$  geringer ist, als nativradiologisch bestimmt. Dies bestätigt zwar die Ergebnisse von Hudek et al. (47), muss aber beachtet werden, wenn Studien mit unterschiedlicher Bildgebung verglichen werden. In Zusammenschau der unterschiedlichen Messmethoden und verschiedenen bildgebenden Verfahren kann also herausgestellt werden, dass der tibiale Slope weniger als nomineller Wert betrachtet werden kann. Vielmehr beschreibt er ein Verhältnis innerhalb einer Studienpopulation, die möglichst reproduzierbar vermessen wurde.



## 2.2 Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität im gesunden Kniegelenk (Arbeit 2)

High tibial slope correlates with increased posterior tibial translation in healthy knees.

Schatka I, Weiler A, Jung TM, Walter TC, **Gwinner C.**

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2018 Sep;26(9):2697-2703.

<https://doi.org/10.1007/s00167-017-4706-4>

Der lineare Zusammenhang zwischen einem erhöhten TS und einer vermehrten ATT im gesunden wie VKB defizienten Kniegelenk wurde bereits angeführt. Der Abhängigkeit des PTT vom TS wurde jedoch bisher keine Beachtung geschenkt, auch wenn davon auszugehen ist, dass die PTT ebenfalls beeinflusst wird. Dieses Wissen ist für die alltägliche Beurteilung der klinischen Untersuchung essentiell, bei denen immer wieder – meist physiologische – Unterschiede in der sagittalen Kniegelenkstabilität gefunden werden. Es ist darüber hinaus aber auch bei der operativen Versorgung von Kreuzbandverletzungen oder bei der Implantation einer Kniegelenksendoprothese (KTEP) von besonderer Wichtigkeit. Verschiedene Autoren haben in diesem Zusammenhang davon geschrieben, dass eine erfolgreiche Operation insbesondere davon abhängig ist, dass der „functional soft tissue envelope of the knee“ rekonstruiert werden kann. Somit wäre es von besonderer Bedeutung, wenn die ursprüngliche sagittale Kniegelenksstabilität im Verletzungsfall anhand eines Röntgenbildes zumindest abgeschätzt werden kann.

Die Untersuchung der PTT kann radiologisch im sog. Telos-Halteapparat erfolgen und standardisiert vermessen werden. Dabei wird im Moment einer apparativen hinteren Schublade ein seitliches Röntgenbild angefertigt, an dem die PTT reproduzierbar quantifiziert werden kann. Da bei Verdacht einer unilateralen HKB-Verletzung auch immer die gesunde Gegenseite vermessen wird, um eine Seitendifferenz erstellen zu können, konnte eine große Anzahl von gesunden Kniegelenken in die Studie eingeschlossen werden, ohne dass diese Patienten einer zusätzlichen Strahlendosis ausgesetzt wurden.

In der vorliegenden Arbeit konnte erstmalig klinisch gezeigt werden, dass eine signifikante Korrelation zwischen einem steigendem tibialen Slope und einer vermehrten PTT im gesunden Kniegelenk besteht. Außerdem zeigte sich, dass eine signifikante Korrelation zwischen dem Patientenalter und PTT besteht. Ein Geschlechtsunterschied konnte hingegen nicht gefunden werden.

In Zusammenschau mit den bereits angeführten Arbeiten zur ATT besteht somit bei steigendem tibialen Slope eine zunehmende – jedoch physiologische – sagittale Instabilität im gesunden Kniegelenk. Diese kann mit steigendem Patientenalter weiter zunehmen.

### 2.3 Einfluss des tibialen Slopes auf das Transplantatversagen nach VKB Rekonstruktion (Arbeit 3)

Graft Survivorship After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Based on Tibial Slope.

**Gwinner C**, Janosec M, Wierer G, Wagner M, Weiler A

Am J Sports Med. 2021 Dec;49(14):3802-3808.

<https://doi.org/10.1177/03635465211049234>

Mittlerweile herrscht Konsens, dass bei Verletzungen des vorderen Kreuzbandes beim jungen, aktiven Patienten mittels anatomischer VKB-Rekonstruktion Rechnung getragen werden sollte. Trotz operationstechnischer Fortschritte wird häufig keine Restitution ad integrum erreicht, auch bei korrekter Bohrkanallage, einer suffizienten Versorgung der Begleitverletzungen und konsequenter Nachbehandlung. Trotz großer wissenschaftlicher Bemühungen, ist bisher wenig über den TS als Risikofaktor für das einfache und insbesondere das mehrfache Versagen von VKB-Rekonstruktionen bekannt (48-50). Ziel der vorliegenden Arbeit war es also, in einem großen Patientenkollektiv mit versagter VKB-Rekonstruktion zu überprüfen, welcher Zusammenhang zwischen dem TS und dem Zeitpunkt bzw. der Anzahl des Transplantatversagens besteht. Ziel war es, bereits eine präoperative Risikostratifizierung für ein potentiell Versagen einer VKB Rekonstruktion treffen zu können.

Hierzu wurden 518 Patienten identifiziert, die ein einfaches oder mehrfaches Versagen ihrer VKB Rekonstruktion erlitten hatten und von denen 346 Patienten eingeschlossen werden konnten. Entsprechend der Anzahl des Transplantatversagens wurden sie in drei Gruppen (A: einmaliges Transplantatversagen n = 260, B: zweimaliges n = 61, C:  $\geq 3$  Transplantatversagen n = 25) aufgeteilt. Es konnte gezeigt werden, dass einerseits die Anzahl der Transplantatversagen signifikant mit dem TS korrelierten ( $r = 0.48$ ;  $P < 0.0001$ ) und andererseits der TS in Gruppe A signifikant niedriger war als in Gruppen B und C. Ein steiler TS war zudem mit einem jüngeren Lebensalter bei Ruptur des nativen VKB

sowie vorzeitigen Transplantatversagen der VKB Rekonstruktion assoziiert. Ein TS > 12° zeigte zudem eine odds ratio von 11.6 für mehrfache VKB Verletzungen. Um Einflussfaktoren – wie Operationsfehler, unterschiedliche Nachbehandlung etc. – zu minimieren, wurden die genannten Auswertungen ebenso an 64 monozentrisch versorgten Patienten vollzogen. Auch hier zeigte sich, dass der TS bei multiplen Transplantatversagen signifikant höher war als nach einem singulären Ereignis.

In Zusammenschau mit der aktuellen Literatur unterstreichen die vorliegenden Ergebnisse die Bedeutung des TS auf das Risiko eines Transplantatversagens nach VKB-Rekonstruktion. Die vorliegende Ergebnisse zeigen zudem, dass ein steiler TS das Risiko erhöht, in jungem Alter eine VKB Ruptur zu erleiden, dass das Risiko für eine Transplantatinsuffizienz steigt und die Zeit bis zum Transplantatversagen kurz ist, was im Einklang mit anderen Arbeiten steht (16, 51, 52). Diese Arbeit kann somit einen Beitrag dazu leisten, dass bereits präoperativ anhand des TS das Risiko eines späteren Transplantatversagens abgeschätzt werden und ggf. modifiziert werden kann.

## 2.4 Einfluss des tibialen Slopes auf das Langzeitergebnis nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes (Arbeit 4)

Tibial Slope Strongly Influences Knee Stability After Posterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Prospective 5- to 15-Year Follow-up.

**Gwinner C**, Weiler A, Roider M, Schaefer FM, Jung TM.

Am J Sports Med. 2017 Feb;45(2):355-361.

<https://doi.org/10.1177/0363546516666354>

Der überwiegende Anteil aller Kreuzbandverletzungen entfällt auf das vordere Kreuzband und ähnlich gestaltet sich auch auf das wissenschaftliche Interesse, so dass Verletzungen des hinteren Kreuzbandes noch immer ein Randdasein fristen. Aufgrund ihrer Seltenheit werden sie nicht nur häufig übersehen, sondern häufig auch nach den bekannten Algorithmen des vorderen Kreuzbandes behandelt, was nicht selten zu schlechten Behandlungsergebnissen führt. Trotz mittlerweile verbesserter Operationsmethoden bleiben die Ergebnisse inkonsistent, nicht zuletzt weil die vorhandenen Studienlage relativ heterogen ist und aufgrund divergierender Therapiealgorithmen schlecht verglichen werden kann. Somit können potentielle Einflussfaktoren wie Lage der Bohrkanäle (53, 54), Transplantatwahl (55), Einzel- vs. Doppelbündelrekonstruktionen oder periphere Begleitverletzungen (56-58) nur schwer quantifiziert werden. Analog zum vorderen Kreuzband sollte in der vorliegenden Arbeit erstmalig der Einfluss des tibialen Slopes auf die PTT im Langzeitverlauf nach HKB Rekonstruktion bestimmt wurde.

Dazu wurden 48 monozentrische Patienten eingeschlossen, die einen Mindestnachuntersuchungszeitraum von 5 Jahren nach HKB-Rekonstruktion aufwiesen. Bei allen Patienten wurde neben dem TS (22) auch die PTT (59) im Vergleich zur gesunden Gegenseite vermessen und die Patienten wurden entsprechend ihrer Begleitverletzungen gruppiert.

Wie nicht anders zu erwarten, konnte die PTT durch die HKB-Rekonstruktion signifikant gesenkt werden ( $10,9 \pm 2,9$  vs  $4,9 \pm 4,3$  mm;  $P < 0.0001$ ). Interessanterweise zeigte sich aber eine signifikante, inverse Korrelation zwischen der

verbleibenden und dem TS ( $r = -0,77$  und  $R^2 = 0,59$ ;  $P < 0.0001$ ). Die Begleitverletzungen hatten keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Anders verhielt es sich, wenn die Patienten nach ihrem TS gruppiert wurden. Hier zeigten Patienten mit einem TS  $< 8^\circ$  eine signifikant schlechtere operative Reduktion der PTT als Patienten  $> 8^\circ$ . Somit konnte aufgezeigt werden, dass Patienten mit einem niedrigen tibialen Slope deutlich schlechtere Langzeitergebnisse ausweisen. Das unterstreicht neben der Bedeutung des TS auf das operative Ergebnis aber auch, dass bereits präoperativ eine Risikostratifizierung vorgenommen werden kann.

## 2.5 Einfluss des tibialen Slopes auf den zeitlichen Verlauf der PTT nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes (Arbeit 5)

Posterior laxity increases over time after PCL reconstruction.

**Gwinner C**, Jung TM, Schatka I, Weiler A.

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019 Feb;27(2):389-396.

<https://doi.org/10.1007/s00167-018-5035-y>

Im Vergleich zwischen biomechanischen und klinischen Arbeiten nach Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes zeigt sich eine deutliche Divergenz zwischen der postoperativen PTT. Während in biomechanischen Arbeiten gezeigt werden kann, dass die PTT auf annähernd physiologische Werte reduziert werden kann (13, 60), zeigen klinische Studien – insbesondere mit mittel- bis langfristigen Nachuntersuchungszeiträumen – dass eine deutliche residuelle PTT verbleibt (40, 61-63). Um die klinischen Ergebnisse zu verbessern, ist es deshalb von besonderer Wichtigkeit zu erkennen, wann diese residuelle PTT entsteht. Besteht diese bereits direkt postoperativ, würde dies für eine unzureichende Operationstechnik sprechen. Entsteht sie erst im postoperativen Verlauf, dann würde dies für biologische Gründe sprechen, die zu einer zunehmenden Elongation des HKB-Transplantates führen. Um sich dieser Fragestellung anzunehmen, wurden Patienten erfasst, die serielle Messungen der PTT erhalten hatten (präoperativ/ 6 Wochen postoperativ/ 3 und 6 Monate postoperativ sowie 2 Jahre und mind. 5 Jahre postoperativ).

Für die vorliegende Arbeit wurden 46 Patienten eingeschlossen, bei denen analog zur vorherigen Studie Begleitverletzungen und TS erfasst wurden. Die PTT konnte durch die HKB Rekonstruktion signifikant gesenkt werden. Diese stieg mit dem Beginn der Vollbelastung und Beendigung der Orthesenbehandlung, also dem 3. postoperativen Monat bei Patienten mit einem  $TS \leq 8^\circ$  bis zum finalen Untersuchungszeitraum stieg die PTT erneut signifikant an. Bei Patienten mit einem  $TS \geq 9^\circ$  blieb die PTT ab dem 3. postoperativen Monat konstant. Alter, Geschlecht oder Begleitverletzungen spielten erneut keine Rolle.

Anhand dieser Daten konnte die Bedeutung des TS auf die PTT nach HKB-Rekonstruktion erneut beschrieben werden. Dabei konnte eindrucksvoll gezeigt werden, wie eine marginal unterschiedliche Ausprägung der zugrundeliegenden tibialen Anatomie darüber entscheidet, welche Belastung die HKB-Rekonstruktion bei Alltagsaktivitäten ausgesetzt wird und welchen Grad der residuellen Instabilität der Patient zurückbehalten wird.



## 2.6 Einfluss des tibialen Slopes auf die Entwicklung von degenerativen Gelenkveränderungen nach HKB Rekonstruktion (Arbeit 6)

Degenerative changes after posterior cruciate ligament reconstruction are irrespective of posterior knee stability: MRI-based long-term results.

**Gwinner C**, Weiler A, Denecke T, Rogasch JMM, Boeth H, Jung TM.

Arch Orthop Trauma Surg. 2018 Mar;138(3):377-385.

<https://doi.org/10.1007/s00402-017-2855-z>

Ziel einer jeden HKB Rekonstruktion ist es, eine vermehrte PTT zu minimieren um subjektive Instabilitätsgefühle und degenerative Gelenkveränderung zu reduzieren. Arthroskopische Studien haben zeigen können, dass eine persistierende Instabilität ein hohes Risiko für frühe Knorpelschäden hat. Strobel et al. konnten zeigen, dass diese insbesondere im medialen (78%), patellofemorale (47%) und laterale (24%) Kompartiment lokalisiert sind (64). Dies scheint durch die hohe Rate an posterolaterale Begleitverletzungen – konsekutiv vermehrter lateraler Aufklappbarkeit und funktioneller Varusfehlstellung – mit vermehrter Belastung des medialen Kompartiments und vermehrter PTT und damit Steigerung des patellofemorale Anpressdruckes verbunden zu sein (65, 66). Diese degenerativen Veränderungen treten dabei sowohl nach konservativer (67-70) als auch nach operativer Therapie auf (71-74). Hervorzuheben ist aber, dass diese Gelenkveränderungen bisher weitestgehend arthroskopisch oder nativradiologisch detektiert wurden. Durch moderne magnetomografische Verfahren kann man mittlerweile diese chondrale wie subchondrale Veränderungen frühzeitig erkennen und semiquantitativ erfassen. Der semiquantitative Score, der für diese Fragestellung die häufigste Verwendung findet, ist der „whole-organ magnetic resonance imaging score (WORMS)“ (75). Bisher wurde dieser aber noch nicht nach HKB-Rekonstruktion angewendet.

Vor diesem Hintergrund wurde die Fragestellung bearbeitet, welche Faktoren im Langzeitverlauf nach HKB-Rekonstruktion zu einer vermehrten Gelenkdegeneration führen. Aufbauend auf den vorangegangenen Arbeiten, sollte zudem herausgestellt

werden, ob der TS neben der verbleibenden PTT auch einen Einfluss auf die angesprochene Gelenkdegeneration hat.

Dazu wurden 42 Patienten eingeschlossen, die nach einem Mindestnachuntersuchungszeitraum von fünf Jahren nach HKB-Rekonstruktion ein bilaterales MRT erhalten haben. Ein Teil der Patienten erhielt zudem ein weiteres ipsilaterales MRT im Abstand von 12 Monaten. Im Vergleich zum gesunden Kniegelenk zeigten sich signifikant mehr degenerative Gelenkveränderungen im WORMS Score im HKB rekonstruierten Kniegelenk. Interessanterweise nahmen diese Veränderungen innerhalb von 12 Monaten weiter signifikant zu. Bezogen auf die Lokalisation im Kniegelenk, war der WORMS Score signifikant höher im Patellofemoralgelenk als im medialen Kompartiment. Dieses wiederum wies einen signifikant höheren WORMS Score als das laterale Kompartiment auf. Bezogen auf den tibialen Slope, in dieser Arbeit MR-Tomografisch auch für den medialen wie lateralen Slope gemessen, konnte eine signifikante Korrelation zwischen TS und verbleibender PTT – wie in den vorangegangenen Studien – bestätigt werden, eine Bedeutung auf den WORMS Score ließ sich aber nicht feststellen. Als signifikanter Risikofaktor für eine vermehrte Gelenkdegeneration konnten begleitende Knorpel- oder Meniskusschäden zum Zeitpunkt der HKB Rekonstruktion herausgestellt werden. Diese Ergebnisse unterstreichen die multifaktorielle Genese der sekundären Gonarthrose, wobei das initiale Trauma ein weitaus höheres als die verbleibende Instabilität und der zugrundeliegende TS zu haben scheint.

## 2.7 Operative Korrekturmöglichkeiten zur Erhöhung des tibialen Slopes (Arbeit 7)

Anterior Open-Wedge Osteotomy in Posterior Cruciate Ligament Deficient Knees: From a Historical Perspective to First Clinical Results.

Weiler A, Dickschas J, **Gwinner C.**

J Knee Surg. 2021 May;34(6):592-598.

<https://doi.org/10.1055/s-0041-1723983>.

Die angesprochenen sagittalen Extensionsosteotomien bei einer VKB Insuffizienz wurden jedoch noch nicht auf das HKB übertragen, wo der tibiale Slope durch eine Flexionsosteotomie operativ erhöht werden müsste. Interessanterweise sind Flexionsosteotomien nicht unbekannt. Vielmehr wurden sie in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts bereits zur Therapie des symptomatischen Genu recurvatum durchgeführt. Ziel der Arbeit war es somit, erste Ergebnisse dieser seltenen Operation auszuwerten und die aktuellen Operationstechniken in den historischen Kontext einzubinden.

Die erste Arbeit zur knöchernen Korrektur des Genu recurvatum beschreibt der Freiburger Chirurg Erich Lexer (1867 – 1937) bereits 1931, nachdem er von 1882 – 1905 Assistenzarzt von Ernst von Bergmann an der Berliner Charité war und ebendort habilitierte (76). Die Zeit seiner Erstbeschreibung fällt in seine Präsidentschaft der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie (1923 – 1936), bevor er posthum aufgrund seiner NS-Vergangenheit in Misskredit geriet. Im Folgejahr beschrieb Campbell erstmals den infratuberositären Zugang zur Flexionsosteotomie (77). In der Folgezeit wurde diese Technik weitestgehend unverändert durchgeführt, bevor Bohn 1956 die subartikuläre Osteotomie, bei der die Tuberositas tibiae nicht abgelöst wird, veröffentlichte (78). Hauptproblem bei der supratuberositär öffnenden Operationstechnik nach Bohn bleibt aber die Erhöhung der patellofemorale Belastung durch die iatrogene Patella baja, so dass sich mittlerweile die Technik nach Lecuire durchgesetzt hat, die 1980 beschrieben wurden (79). Dabei wird die

Tuberositas temporär abgelöst und später zurückgeklappt als biologische Platte verwendet (80-82).

Aufbauend auf diese Arbeiten wurde die Operationsmethode nach Lecuire modifiziert und bei einem ersten, kleineren Patientenkollektiv mit HKB Insuffizienz und begleitendem flachen tibialen Slope angewendet. Hierbei zeigte sich, dass der tibiale Slope reproduzierbar signifikant erhöht werden kann und die Operationstechnik mit einer niedrigen Komplikationsrate einhergeht. Trotzdem müssen diese ersten Ergebnisse durch größere Patientenkohorten mit einem langfristigen Nachuntersuchungszeitraum bestätigt werden.

### 3. Diskussion

„Ich denke sowieso mit dem Knie.“ Das stand 1977 auf einer Postkarte von Joseph Beuys. Auch wenn Beuys durchaus Humor gehabt hat, wollte er nach Angaben seines Gesprächspartners Michael Schirner damals vielmehr andeuten, „dass lineares logisches Denken mit dem Kopf und Gehirn der Komplexität des künstlerischen Denkens nicht entspräche.“ Bereits weit vor dieser Zeit wurde versucht, durch lineares logisches Denken, ebendieses Kniegelenk zu begreifen, dass in den letzten 370 Millionen Jahren Evolution ausgereift erscheint, aber dessen Komplexität bis heute Fragen aufwirft.

In der vorliegenden Habilitationsschrift wurde nur ein kleiner Anteil des Kniegelenkes, nämlich die dorsale Reklination des Tibiaplateaus untersucht, welcher aber nicht selten bedeutungsschwanger als „fingerprint of the tibial bone“ (83)“ oder „the unknown size of the knee joint“ (84) beschrieben wird. Mittlerweile wissen wir, dass der tibiale Slope ganz unterschiedliche Werte betragen kann, aber auch eine exzessive Ausprägung nicht zwingend einen Krankheitswert hat (Arbeit 2). Trotzdem spielt diese Ausprägung bei fast jeder Operation des Kniegelenkes eine Rolle, so dass der tibiale Slope im klinischen Alltag gemessen (Arbeit 1), in den Entscheidungsprozess einer operativen Indikationsstellung einbezogen (Arbeit 3, 4, 5, 6) und bei einem Therapieversagen korrigiert werden sollte (Arbeit 7). Im Speziellen widmen sich die Arbeiten dem Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität. Dieses Wissen kann somit bereits im Vorfeld einer operativen Versorgung zur Identifikation von Risikopatienten für ein späteres Therapieversagen beitragen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Arbeit der aktuellen Literatur gegenübergestellt, diskutiert sowie die abzuleitenden klinischen Konsequenzen beschrieben.

### **3.1 Einfluss des tibialen Slope auf die sagittale Kniegelenksstabilität im unverletzten Kniegelenk**

Jeglicher wissenschaftlichen Diskussion ist gemein, dass eine reproduzierbare Messmethodik zugrunde liegt. Dieses ist eine Herausforderung in Hinblick auf den tibialen Slope, da jede Messung lediglich eine zweidimensionale Näherung seiner komplexen dreidimensionalen Oberfläche ist. Dieses spiegelt sich auch darin wieder, dass verschiedene Goldstandards definiert wurden. Einerseits wird postuliert, dass Längsaufnahmen des Unterschenkels verwendet werden sollen, um die Tibiaschaftachse mit Hilfe des oberen Sprunggelenkes zu bestimmen (85). Andererseits werden schnittbildgebene Verfahren propagiert, um den medialen vom lateralen tibialen Slope zu diskriminieren (47). Beide Forderungen werden vielleicht einer akademischen Diskussion – aber nicht einer alltäglichen Anwendung – gerecht. Vielmehr wird den kurzen, seitlichen Röntgenbildern eine besondere Bedeutung zuteil, da sie die größte Verfügbarkeit im klinischen Alltag aufweisen.

Unsere Studie (Arbeit 1) konnte zeigen, dass die Reproduzierbarkeit von kurzen, seitlichen Röntgenbildern für die Bestimmung des tibialen Slopes signifikant verbessert werden kann, wenn einfache Qualitätskriterien beachtet werden. Hierbei wurde insbesondere eine Mindestlänge der tibialen Schaftachse als auch die Anforderungen an einen streng seitlichen Strahlengang definiert. Dieses ist in Einklang mit den Arbeiten von Faschingbauer et al. (85), Utzschneider et al. (86) und Dean et al. (87), die zeigen konnte, dass eine zu kurze tibiale Schaftachse zu einer falsch hohen Bestimmung führen kann, ansonsten aber mit langen Unterschenkelaufnahmen vergleichbar sind. Kessler et al. (88) konnten analog zeigen, dass eine vermehrte Rotation des Kniegelenkes die Reproduzierbarkeit negativ beeinflusst.

Herausgestrichen wurde ebenfalls, dass der nominale Wert des tibialen Slopes in erster Linie von der Akquisitionstechnik abhängt, welches im Einklang mit anderen Studien ist (47, 87, 89). Vielmehr beschreibt er somit ein Verhältnis innerhalb einer Studienpopulation, die identisch vermessen wurde. Dieses muss bei der Interpretation der aktuellen Studien beachtet werden, insbesondere wenn Grenzwerte definiert werden.

Trotz aller Unterschiede in Bezug auf seine Messung, ist mittlerweile akzeptiert, dass ein höherer tibialer Slope zu einer verstärkten anterioren tibialen Translation im gesunden Kniegelenk führt (22, 90). Dieses kann damit erklärt werden, dass das

Femur bereits bei Alltagsaktivitäten vermehrt dem tibialen Gefälle in der Sagittalebene nach dorsal folgt, was dazu führt, dass die Tibia nach ventral in die vordere Schublade geschoben wird. Da das vordere Kreuzband der primäre Stabilisator gegen die anteriore tibiale Translation ist, hat der tibiale Slope somit einen signifikanten Einfluss – vor allem in beginnender Kniebeugung – auf die In-situ-Kräfte des vorderen Kreuzbandes (24, 91).

Während dieser Zusammenhang in zahlreichen Studien dargelegt wurde, ist der Einfluss des tibialen Slopes auf die posteriore tibiale Translation im gesunden Kniegelenk weit weniger untersucht. In unserer Studie (Arbeit 2) konnten wir zeigen, dass ein höherer tibialer Slope ebenso mit einer vermehrten posterioren tibialen Translation einhergeht. In Zusammenschau mit den bereits angeführten Studien scheint ein zunehmender tibialer Slope also mit einer vermehrten sagittalen Laxizität einherzugehen. Dass dies nicht unbedingt einen Krankheitswert haben muss, zeigen anatomische Studien, die beschreiben, dass ca. 30% der Patienten einen besonders hohen bzw. niedrigen tibialen Slope aufweisen (21, 92). Die Inzidenz von Kreuzbandverletzungen ist jedoch um ein vielfaches kleiner. Diese Diskrepanz kann damit erklärt werden, dass die erhobene anteriore wie posteriore tibiale Translation gemessen wird, wenn der Tonus der knieumgreifenden Muskulatur minimal ist. Man nimmt an, dass Individuen diese vermehrte sagittale Laxizität durch ihre Muskulatur kompensieren, oder Bewegungsmuster verwenden, welche die tibiale Translation effektiv vermindern (93, 94). Während dies für Alltagsaktivitäten zutreffen mag, kann dies in Extremsituationen nicht mehr kontrolliert werden.

So imponiert bei einer Verletzung des vorderen Kreuzbandes zumeist ein Valgusmoment in Beugung, der nicht mehr aktiv abgefangen werden kann (95). Unter axialer Belastung gleitet die laterale Femurkondyle auf dem Tibiaplateau nach dorsal, was mit einer relativen Außenrotation des Femurs und einer Spannungszunahme des vorderen Kreuzbandes einhergeht. Steigt die dorsale Reklination des Tibiaplateaus, also der tibial Slope, verstärkt sich damit dieser Effekt, was entscheidend dafür sein kann, ob das vordere Kreuzband reißt oder der Belastung standhält (96).

Letztendlich ist die Anzahl an Arbeiten erdrückend, die zeigen, dass ein erhöhter tibialer Slope mit einem erhöhten Risiko für eine Ruptur des vorderen Kreuzbandes einhergeht. Dies zeigt sich sowohl im Computer- (25, 97) und Kadavermodell (96, 98) sowie in klinischen Studien (99-101). Dabei scheint insbesondere der konvexe laterale

tibiale Slope von besonderer Bedeutung zu sein (102). Dies lässt sich mit der Konkavität des medialen Tibiaplateaus erklären, welches – aufgrund des höheren Formschlusses mit der medialen Femurkondyle – anteroposterioren Translationsbewegungen entgegenwirkt.

Verletzungen des hinteren Kreuzbandes werden meist durch eine forcierte hintere Schublade, also einen prätibialen Sturz oder Anprall auf das gebeugte Kniegelenk verursacht. Ein flacher tibialer Slope unterstützt diesen nach dorsal gerichteten Kraftvektor, der primär vom hinteren Kreuzband abgefangen wird. Passend dazu konnten Bernhardson et al. in einer matched-paired Analyse zeigen, dass der tibiale Slope bei Patienten mit einer Verletzung des hinteren Kreuzbandes signifikant geringer ist als bei einer Kontrollkohorte: Interessanterweise insbesondere bei non-contact Verletzungen, was die Bedeutung des tibialen Slopes weiter herausstreicht. (103).



### **3.2 Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität nach Kreuzbandrekonstruktion**

Aktuell stellt die operative Kreuzbandrekonstruktion die Therapie der Wahl beim jungen, symptomatisch instabilen Patienten dar. Im Vergleich zur konservativen Therapie kann auf diese Weise eine hohe Rückkehr zum ursprünglichen Aktivitätsniveau erreicht werden. Als wichtige Faktoren für das postoperative Outcome einer Kreuzbandrekonstruktion werden individuelle Risikofaktoren, erneute Traumata und die technische Umsetzung der Kreuzbandrekonstruktion – wie Bohrkanalanlage, Transplantatwahl und Transplantatfixierung sowie die Versorgung begleitender peripherer Instabilitäten – postuliert. Als Transplantat wird hierzulande in den allermeisten Fällen autologe Sehnen der Hamstringsmuskulatur verwendet, welche neben ihrer Entnahmemorbidität aber auch die Funktion der knieumgreifenden Muskulatur verändern. Die angesprochene Hamstringmuskulatur hat eigentlich eine agonistische Wirkung auf die Funktion des vorderen Kreuzbandes und wird interessanterweise ebenso durch die Ausprägung des tibialen Slopes beeinflusst. Wie bereits eingangs beschrieben, geht ein steilerer tibialer Slope – insbesondere bei begleitender Insuffizienz des vorderen Kreuzbandes – mit einer vermehrten anterioren tibialen Translation einher. Dies erhöht signifikant die Vorspannung der Hamstringmuskulatur in Ruhe und die Kraftaufwendung, um bei Alltagsaktivitäten die vermehrte ATT zu kompensieren (104). Kommt es also zu einer iatrogenen Schwächung dieser Muskelgruppe durch eine Sehnenentnahme im Rahmen einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion, werden bei Patienten mit einem hohen tibialen Slope – neben den angesprochenen biomechanischen Auswirkungen auf die vordere Kreuzbandrekonstruktion – auch ihre aktiven Kompensationsmöglichkeiten verschlechtert.

Auch wenn das Versagen einer Kreuzbandrekonstruktion weiterhin als multifaktoriell angesehen wird, wurde die Bedeutung des tibialen Slopes – als individueller Risikofaktor – in den letzten Jahren weiter herausgearbeitet. Dies konnte in den vorliegenden Arbeiten (Arbeit 3-6) weiter unterstrichen werden.

Bezogen auf das vordere Kreuzband (Arbeit 3) konnte gezeigt werden, dass Patienten mit einem hohen tibialen Slope signifikant jünger sind, wenn sie ihre Erstverletzung erleiden. Eine Kreuzbandrekonstruktion in diesen Patienten versagt zudem signifikant früher, so dass sie ein signifikant höheres Risiko für Mehrfachverletzungen haben. In

Zusammenschau mit der aktuellen Literatur unterstreichen die vorliegenden Ergebnisse, dass Patienten mit einem höheren tibialen Slope nicht nur ein erhöhtes Risiko haben, schon früh eine vordere Kreuzbandverletzung zu erleiden, sondern auch, dass ihre Kreuzbandrekonstruktion deutlich früher versagen wird und sie dadurch signifikant häufiger operiert werden müssen, wenn der tibiale Slope nicht adressiert wird. Webb et al. konnten zeigen, dass sich bei einem tibialen Slope von  $12^\circ$  das Risiko für ein Transplantatversagen auf das Fünffache erhöht (52) und Salmon et al. konnten bei Heranwachsenden mit einem tibialen Slope von  $> 12^\circ$  nach 20 Jahren lediglich in 22% eine intakte VKB Rekonstruktion finden (16). Napier et al. konnten unsere Ergebnisse dahingehend bestätigen, dass der tibiale Slope auch in einer Revisionskohorte das Risiko für ein erneutes Transplantatversagen beeinflusst (105).

Analog zum vorderen Kreuzband konnte in den vorliegenden Arbeiten (Arbeit 4-6) ebenso der Einfluss des tibialen Slopes auf den Langzeitverlauf nach HKB Rekonstruktion bestimmt werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine signifikante inverse Korrelation zwischen dem tibialen Slope und der verbleibenden hinteren Schublade besteht, bei Patienten mit einem flachen tibialen Slope also eine signifikant höhere residuelle Instabilität zurückbleibt. Interessanterweise hatten periphere Instabilitäten, die mitversorgt werden mussten und bis dato als ausschlaggebend angesehen wurden, keinen Einfluss auf dieses Ergebnis. Zudem konnte kein Zusammenhang zwischen dem tibialen Slope, der verbleibenden Instabilität und der Entwicklung einer posttraumatischen Gelenkdegeneration gefunden werden.

Mögliche Auswirkungen des tibialen Slopes auf die dorsale Stabilität nach hinterer Kreuzbandrekonstruktion wurde bisher in lediglich von zwei anderen Arbeitsgruppen aufgearbeitet. In einem Kadavermodell konnten Bernhardson et al. die dargestellten Ergebnisse belegen, indem die zeigen konnten, dass die Belastung der hinteren Kreuzbandrekonstruktion bei abnehmenden tibialen Slope zunahm (106). Interessanterweise lag diese signifikante höhere Belastung bei allen Beugegraden vor, welches unsere klinischen Daten bestätigt und erklärt, warum bei Patienten mit einem niedrigen tibialen Slope die hintere Schublade über die Zeit weiter zunimmt, während diese ab einem moderaten tibialen Slope stabil bleibt. Ebenso konnten Winkler et al. anhand von klinischen Daten zeigen, dass eine Reduktion des tibialen

Slopes mit jedem Grad mit einer 1,3-fachen Erhöhung des Therapieversagens einhergeht (107).

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte der Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität herausgearbeitet werden, Risikopatienten für ein verfrühtes Versagen einer vorderen bzw. hinteren Kreuzbandrekonstruktion identifiziert und operative Korrekturmöglichkeiten beschrieben werden. Die Annahme, dass ein hoher tibialer Slope das Risiko für das Versagen einer vorderen und ein niedriger tibialer Slope das Risiko für das Versagen einer hinteren Kreuzbandrekonstruktion erhöht, konnte folglich bestätigt werden.

Mit jeder weiteren Studie zu diesem Thema wird aber auch die Frage größer, welche therapeutische Konsequenz hieraus entsteht. Frei nach Aristoteles können wir zwar den Wind nicht ändern, aber die Segel anders setzen. Und so nimmt die Anzahl von Veröffentlichungen über Slope-korrigierende Osteotomien stetig zu. Diese kann entweder als Extensionsosteotomie (108) durchgeführt werden, um den tibialen Slope zu verringern oder als Flexionsosteotomie (Arbeit 7), um den tibialen Slope zu erhöhen. Beiden Verfahren ist gemein, dass es noch keine klaren Indikationen zur Durchführung dieser technisch anspruchsvollen Operationen gibt.

Bezogen auf das Vorliegen einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion bzw. einem Transplantatversagen einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion scheint sich ein tibialer Slope  $> 12^\circ$  durchzusetzen (49, 109-115). In Kadaverstudien konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass durch eine Flexionsosteotomie die einwirkende Kräfte auf das vordere Kreuzbandtransplantat signifikant gesenkt werden können (116, 117). Über die klinischen Ergebnisse wurde bisher in kleineren Fallserien berichtet. 2014 berichteten Sonnery-Cottet et al. (49) über fünf Patienten nach versagter vorderer Kreuzbandrekonstruktion, bei denen der tibiale Slope in Kombination mit einer erneuten vorderen Kreuzbandrekonstruktion von  $13,6^\circ$  auf  $9,2^\circ$  reduziert wurde. Nach einem mittleren Follow-Up von 32 Monaten konnten die subjektiven wie objektiven Scores signifikant verbessert und die ATT von 10,4mm auf 2,8mm reduziert werden. In den Folgejahren konnten verschiedene Autoren diese Ergebnisse bestätigen (111-113). In einer eigenen Arbeit konnte erstmals in einem großen Patientenkollektiv dargelegt werden, dass diese Technik den tibialen Slope reproduzierbar senken kann, das koronare Alignment nicht beeinträchtigt wird und in

geübten Händen zu einer niedrigen Komplikationsrate führt (108). Vor diesem Hintergrund sollte die Indikation zur Extensionsosteotomien in der Revisionsituation oder schon nach stattgehabter primärer Kreuzbandverletzung und ausgeprägtem tibialen Slope in Erwägung gezogen werden.

Die klassische Indikation für eine Flexionsosteotomie war seit den 1930er Jahren das symptomatische Genu recurvatum. Aufbauend auf die biomechanischen Arbeiten von Agneskirchner et al. (23) bzw. Giffin et al. (24) und der zunehmenden klinischen Evidenz, dass ein flacher tibialer Slope zu einem schlechteren Ergebnis nach hinterer Kreuzbandrekonstruktion führt, wird diese Operationsmethode mittlerweile auch zur Erhöhung des tibialen Slopes herangezogen. Aufgrund der deutlichen selteneren hinteren Kreuzbandverletzung, stellt diese Operation aber auch weiterhin eine Rarität dar. Im eigenen Patientenkollektiv (Arbeit 7) konnte aber auch hier gezeigt werden, dass der tibiale Slope reproduzierbar erhöht werden kann und lediglich eine niedrige Komplikationsrate besteht.

Die jüngste Entwicklung in der wissenschaftlichen Literatur und die vorliegenden Arbeiten widersprechen damit auf den ersten Blick dem Leitsatz „form follows function“ des Bauhaus-Architekten Ludwig Mies van der Rohe; scheint die Funktion bzw. das Versagen der Kreuzbänder doch der Form der proximalen Tibia zu folgen. Wahrscheinlich wird diese Annahme aber der multifaktoriellen Genese von Kreuzbandverletzungen und dem evolutionären Prozess unseres menschlichen Kniegelenkes nicht gerecht, dass zahlreichen Modifikationen sowie natürlicher Selektion unterworfen war. Vieles was wir als einzigartig ansehen, hat doch einen gemeinsamen Ursprung mit Tetrapoden, also allen vierfüßigen Tieren wie Amphibien, Reptilien, Vögeln und Säugetieren (118). Diese gehen auf die Ichthyostega zurück, die vor ca. 360 Millionen als erste Tetrapoden zeitweise auf Land lebten. Bereits hier zeigte sich ein bikondylärer Femur, der mit Tibia und Fibula artikulierte (119). Beim späteren Eryops - der vor ca. 250 Millionen Jahren lebte - konnte eine vergleichbare tibiofemorale Artikulation, Menisken, Kreuz- und Kollateralbänder nachgewiesen werden, die in dieser Form in verschiedenen Arten bis heute Bestand haben (120). Vor 215 bis 70 Millionen Jahren begann sich das Femur bei Dinosauriern und Säugetieren nach innen zu rotieren, so dass das Kniegelenk die vordere Kontur der Extremitäten bildete – vergleichbar mit den heutigen Kniegelenken von Menschen und vielen Tetrapoden. Anders als das humane Kniegelenk belasten ein Großteil der

Tetrapoden ihre Kniegelenke aber hauptsächlich in tiefer Flexion, während der aufrechte, humane Gang in den strecknahen 20° Flexion stattfindet. Dies führt dazu, dass der tibiale Slope der Tetrapoden deutlich höher ist als beim Menschen (121). Am nächsten kommt das humane Kniegelenk dem von Tieren mit einem graviportalen Bewegungsmuster wie Flusspferden oder Elefanten, die sich aufgrund des hohen Gewichtes ihrer Körper, Köpfe oder des Rüssels von bis zu 135 kg, in einem strecknahen Gangbild fortbewegt (122). Unterschiedlich ist jedoch die Konfiguration der Kreuzbänder und des lateralen Kompartimentes, das beispielsweise beim Elefanten konkav und beim Menschen konvex ist. Letztendlich ermöglicht diese Form aber die Funktion, sich in den aufrechten Stand aufzurichten. Dies wiederum findet man bei Schwarzbären, die zumindest relativ sicher auf ihren Hinterläufen stehen oder kleinere Strecken darauf laufen können. Die anatomische Ausprägung des Skelettsystems scheint pränatal genetisch determiniert und postnatal dem Wolff'schen Gesetz zu folgen. Der namensgebende Berliner Anatom und Chirurg Julius Wolff (1836-1902) stellte früh die Beziehung zwischen Knochenstruktur und -belastung dar, welches auch heute noch als dominierendes Paradigma in der muskuloskeletalen Chirurgie Bestand hat und den Grundstein für die Ausprägung einzelner Knochen bildet. Warum bei den angesprochenen Schwarzbären während ihres sechsmonatigen Winterschlafes die Anordnung der Knochentrabekel und die Kortikalisdicke komplett unverändert bleibt, kann jedoch auch das Wolff'sche Gesetz nicht erklären (123, 124). Die gemeinsamen anatomischen und funktionalen Merkmale mit lebenden Tetrapoden legen nahe, dass das humane Kniegelenk ein zutiefst anpassungsfähiges, biomechanisches System ist, welches sich über die letzten 300 Millionen so bewährt hat, dass es lediglich kleineren Modifikationen unterworfen war. Die Gemeinsamkeiten dieser evolutionär ausgereiften anatomischen Strukturen impliziert aber auch, dass die eine aberrante Ausprägung einzelner Strukturen die komplexe Kniegelenkskinematik nachhaltig beeinflussen können.

Auch wenn in der letzten Dekade enorme wissenschaftliche Fortschritte in Bezug auf den Einfluss des tibialen Slopes auf die sagittale Kniegelenksstabilität erzielt wurden, bleiben zahlreiche Fragen unbeantwortet. Wir können weiterhin weder die breite interindividuelle Varianz des tibialen Slopes erklären, noch können wir das Risiko für Kreuzbandverletzungen bei gesunden Individuen beziffern, welche anatomische Risikofaktoren besitzen. Es ist weder beantwortet, ob man den tibialen Slope bei

Risikopatienten bereits beim Vorliegen der Kreuzbandverletzung oder erst bei Versagen der Kreuzbandrekonstruktion adressieren sollte, noch wurden hierfür – neben der Akquisitionstechnik - allgemeingültige Grenzwerte definiert. Vor diesem Hintergrund werden erst die subjektiven und objektiven Ergebnisse nach operativer Korrektur des tibialen Slopes zeigen, ob die klinische Bedeutung dem aktuellen wissenschaftlichen Stellenwert des tibialen Slopes gerecht wird oder ob man ein multifaktorielles Geschehen auf einen offensichtlichen, weil eben gut messbaren, Parameter reduziert hat.

## Literatur

1. Proffen BL, McElfresh M, Fleming BC, Murray MM. A comparative anatomical study of the human knee and six animal species. *Knee*. 2012;19(4):493-9.
2. Weissengruber GE, Fuss FK, Egger G, Stanek G, Hittmair KM, Forstenpointner G. The elephant knee joint: morphological and biomechanical considerations. *J Anat*. 2006;208(1):59-72.
3. Zarins B, Rowe CR, Harris BA, Watkins MP. Rotational motion of the knee. *Am J Sports Med*. 1983;11(3):152-6.
4. Siebold R, Schuhmacher P, Fernandez F, Śmigielski R, Fink C, Brehmer A, et al. Flat midsubstance of the anterior cruciate ligament with tibial "C"-shaped insertion site. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2015;23(11):3136-42.
5. Mochizuki T, Fujishiro H, Nimura A, Mahakkanukrauh P, Yasuda K, Muneta T, et al. Anatomic and histologic analysis of the mid-substance and fan-like extension fibres of the anterior cruciate ligament during knee motion, with special reference to the femoral attachment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014;22(2):336-44.
6. Girgis FG, Marshall JL, Monejem A. The Cruciate Ligaments of the Knee Joint: Anatomical. Functional and Experimental Analysis. *Clin Orthop Relat Res*. 1975;106:216-31.
7. Harner CD, Baek GH, Vogrin TM, Carlin GJ, Kashiwaguchi S, Woo SL. Quantitative analysis of human cruciate ligament insertions. *Arthroscopy*. 1999;15(7):741-9.
8. Petersen W, Zantop T. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles. *Clin Orthop Relat Res*. 2007;454:35-47.
9. Mannel H, Marin F, Claes L, Dürselen L. Anterior cruciate ligament rupture translates the axes of motion within the knee. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2004;19(2):130-5.
10. Gee MSM, Peterson CDR, Zhou ML, Bottoni CR. Anterior Cruciate Ligament Repair: Historical Perspective, Indications, Techniques, and Outcomes. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020;28(23):963-71.
11. Burnett QM, 2nd, Fowler PJ. Reconstruction of the anterior cruciate ligament: historical overview. *Orthop Clin North Am*. 1985;16(1):143-57.



12. Amis AA, Gupte CM, Bull AM, Edwards A. Anatomy of the posterior cruciate ligament and the meniscofemoral ligaments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14(3):257-63.
13. Race A, Amis AA. The mechanical properties of the two bundles of the human posterior cruciate ligament. *J Biomech.* 1994;27(1):13-24.
14. Weiler A, Frosch KH, Gwinner C, Strobel MJ, Lobenhoffer P. The Posterolateral Instability Score (PoLIS) of the knee joint: a guideline for standardized documentation, classification, and surgical decision-making. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2021;29(3):889-99.
15. Fischer LP. Amédée Bonnet was one of the main surgeons (Chirurgien-major) in Lyon's Hôtel-Dieu Hospital. *Hist Sci Med.* 1996;30(4):449-58.
16. Salmon LJ, Heath E, Akrawi H, Roe JP, Linklater J, Pinczewski LA. 20-Year Outcomes of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Hamstring Tendon Autograft: The Catastrophic Effect of Age and Posterior Tibial Slope. *Am J Sports Med.* 2018;46(3):531-43.
17. Wright RW, Gill CS, Chen L, Brophy RH, Matava MJ, Smith MV, et al. Outcome of revision anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *J Bone Joint Surg Am.* 2012;94(6):531-6.
18. Wright R, Spindler K, Huston L, Amendola A, Andrish J, Brophy R, et al. Revision ACL reconstruction outcomes: MOON cohort. *J Knee Surg.* 2011;24(4):289-94.
19. Genin P, Weill G, Julliard R. The tibial slope. Proposal for a measurement method. *J Radiol.* 1993;74(1):27-33.
20. Nunley RM, Nam D, Johnson SR, Barnes CL. Extreme variability in posterior slope of the proximal tibia: measurements on 2395 CT scans of patients undergoing UKA? *J Arthroplasty.* 2014;29(8):1677-80.
21. Weinberg DS, Williamson DF, Gebhart JJ, Knapik DM, Voos JE. Differences in Medial and Lateral Posterior Tibial Slope: An Osteological Review of 1090 Tibiae Comparing Age, Sex, and Race. *Am J Sports Med.* 2017;45(1):106-13.
22. Dejour H, Bonnin M. Tibial translation after anterior cruciate ligament rupture. Two radiological tests compared. *J Bone Joint Surg Br.* 1994;76(5):745-9.
23. Agneskirchner JD, Hurschler C, Stukenborg-Colsman C, Imhoff AB, Lobenhoffer P. Effect of high tibial flexion osteotomy on cartilage pressure and joint

kinematics: a biomechanical study in human cadaveric knees. Winner of the AGA-DonJoy Award 2004. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2004;124(9):575-84.

24. Giffin JR, Vogrin TM, Zantop T, Woo SL, Harner CD. Effects of increasing tibial slope on the biomechanics of the knee. *Am J Sports Med.* 2004;32(2):376-82.

25. Shelburne KB, Kim HJ, Sterett WI, Pandy MG. Effect of posterior tibial slope on knee biomechanics during functional activity. *J Orthop Res.* 2011;29(2):223-31.

26. Rahnemai-Azar AA, Abebe ES, Johnson P, Labrum J, Fu FH, Irrgang JJ, et al. Increased lateral tibial slope predicts high-grade rotatory knee laxity pre-operatively in ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25(4):1170-6.

27. Singerman R, Dean JC, Pagan HD, Goldberg VM. Decreased posterior tibial slope increases strain in the posterior cruciate ligament following total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 1996;11(1):99-103.

28. Yoshiya S, Andrish JT, Manley MT, Bauer TW. Graft tension in anterior cruciate ligament reconstruction. An in vivo study in dogs. *Am J Sports Med.* 1987;15(5):464-70.

29. Okutan AE, Kalkışım M, Gürün E, Ayas MS, Aynacı O. Tibial slope, remnant preservation, and graft size are the most important factors affecting graft healing after ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2021.

30. Shelbourne KD, Benner RW, Jones JA, Gray T. Posterior Tibial Slope in Patients Undergoing Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Patellar Tendon Autograft: Analysis of Subsequent ACL Graft Tear or Contralateral ACL Tear. *Am J Sports Med.* 2021;49(3):620-5.

31. Winkler PW, Wagala NN, Hughes JD, Lesniak BP, Musahl V. A high tibial slope, allograft use, and poor patient-reported outcome scores are associated with multiple ACL graft failures. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2021.

32. Ni QK, Song GY, Zhang ZJ, Zheng T, Feng Z, Cao YW, et al. Steep Posterior Tibial Slope and Excessive Anterior Tibial Translation Are Predictive Risk Factors of Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Failure: A Case-Control Study With Prospectively Collected Data. *Am J Sports Med.* 2020;48(12):2954-61.

33. Yoon KH, Park SY, Park JY, Kim EJ, Kim SJ, Kwon YB, et al. Influence of Posterior Tibial Slope on Clinical Outcomes and Survivorship After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Hamstring Autografts: A Minimum of 10-Year Follow-Up. *Arthroscopy.* 2020;36(10):2718-27.

34. Hughston JC. Anterior cruciate deficient knee. *Am J Sports Med.* 1983;11(1):1-2.
35. Tillmann B. A contribution to the functional morphology of articular surfaces. *Norm Pathol Anat (Stuttg).* 1978;34:1-50.
36. Martin RK, Ekås GR, Benth J, Kennedy N, Moatshe G, Krych AJ, et al. Change in Posterior Tibial Slope in Skeletally Immature Patients With Anterior Cruciate Ligament Injury: A Case Series With a Mean 9 Years' Follow-up. *Am J Sports Med.* 2021;49(5):1244-50.
37. Kamath GV, Redfern JC, Greis PE, Burks RT. Revision anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med.* 2011;39(1):199-217.
38. Hammoud S, Reinhardt KR, Marx RG. Outcomes of posterior cruciate ligament treatment: a review of the evidence. *Sports Med Arthrosc Rev.* 2010;18(4):280-91.
39. Lien OA, Aas EJ, Johansen S, Ludvigsen TC, Figved W, Engebretsen L. Clinical outcome after reconstruction for isolated posterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2010;18(11):1568-72.
40. Sekiya JK, West RV, Ong BC, Irrgang JJ, Fu FH, Harner CD. Clinical outcomes after isolated arthroscopic single-bundle posterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy.* 2005;21(9):1042-50.
41. Fanelli GC, Edson CJ. Arthroscopically assisted combined anterior and posterior cruciate ligament reconstruction in the multiple ligament injured knee: 2- to 10-year follow-up. *Arthroscopy.* 2002;18(7):703-14.
42. Savarese E, Bisicchia S, Romeo R, Amendola A. Role of high tibial osteotomy in chronic injuries of posterior cruciate ligament and posterolateral corner. *J Orthop Traumatol.* 2011;12(1):1-17.
43. Novaretti JV, Sheean AJ, Lian J, De Groot J, Musahl V. The Role of Osteotomy for the Treatment of PCL Injuries. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2018;11(2):298-306.
44. Tischer T, Paul J, Pape D, Hirschmann MT, Imhoff AB, Hinterwimmer S, et al. The Impact of Osseous Malalignment and Realignment Procedures in Knee Ligament Surgery: A Systematic Review of the Clinical Evidence. *Orthop J Sports Med.* 2017;5(3):2325967117697287.
45. Lobenhoffer P. Chronic instability after posterior cruciate ligament injury. Tactics, techniques, and results] *Unfallchirurg.* 1999;102(11):824-38.
46. Reichwein F, Nebelung W. High tibial flexion osteotomy for revision of posterior cruciate ligament instability. *Unfallchirurg.* 2007;110(7):597-602.

47. Hudek R, Schmutz S, Regenfelder F, Fuchs B, Koch PP. Novel measurement technique of the tibial slope on conventional MRI. *Clin Orthop Relat Res.* 2009;467(8):2066-72.
48. Sonnery-Cottet B, Archbold P, Cucurulo T, Fayard JM, Bortolletto J, Thaunat M, et al. The influence of the tibial slope and the size of the intercondylar notch on rupture of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* 2011;93(11):1475-8.
49. Sonnery-Cottet B, Mogos S, Thaunat M, Archbold P, Fayard JM, Freychet B, et al. Proximal Tibial Anterior Closing Wedge Osteotomy in Repeat Revision of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2014;42(8):1873-80.
50. Misir A, Sayer G, Uzun E, Guney B, Guney A. Individual and Combined Anatomic Risk Factors for the Development of an Anterior Cruciate Ligament Rupture in Men: A Multiple Factor Analysis Case-Control Study. *Am J Sports Med.* 2022:3635465211062594.
51. Christensen JJ, Krych AJ, Engasser WM, Vanhees MK, Collins MS, Dahm DL. Lateral Tibial Posterior Slope Is Increased in Patients With Early Graft Failure After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2015;43(10):2510-4.
52. Webb JM, Salmon LJ, Leclerc E, Pinczewski LA, Roe JP. Posterior tibial slope and further anterior cruciate ligament injuries in the anterior cruciate ligament-reconstructed patient. *Am J Sports Med.* 2013;41(12):2800-4.
53. Lee YS, Ra HJ, Ahn JH, Ha JK, Kim JG. Posterior cruciate ligament tibial insertion anatomy and implications for tibial tunnel placement. *Arthroscopy.* 2011;27(2):182-7.
54. Campbell RB, Jordan SS, Sekiya JK. Arthroscopic tibial inlay for posterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy.* 2007;23(12):1356.e1-4.
55. Kim SJ, Jung M, Moon HK, Kim SG, Chun YM. Anterolateral transtibial posterior cruciate ligament reconstruction combined with anatomical reconstruction of posterolateral corner insufficiency: comparison of single-bundle versus double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction over a 2- to 6-year follow-up. *Am J Sports Med.* 2011;39(3):481-9.
56. Apsingi S, Bull AM, Deehan DJ, Amis AA. Review: femoral tunnel placement for PCL reconstruction in relation to the PCL fibre bundle attachments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(6):652-9.
57. Apsingi S, Nguyen T, Bull AM, Unwin A, Deehan DJ, Amis AA. A comparison of modified Larson and 'anatomic' posterolateral corner reconstructions in knees with

combined PCL and posterolateral corner deficiency. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(3):305-12.

58. Apsingi S, Nguyen T, Bull AM, Unwin A, Deehan DJ, Amis AA. Control of laxity in knees with combined posterior cruciate ligament and posterolateral corner deficiency: comparison of single-bundle versus double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction combined with modified Larson posterolateral corner reconstruction. *Am J Sports Med.* 2008;36(3):487-94.

59. Jacobsen K. Stress radiographical measurement of the anteroposterior, medial and lateral stability of the knee joint. *Acta Orthop Scand.* 1976;47(3):335-4.

60. Race A, Amis AA. PCL reconstruction. In vitro biomechanical comparison of 'isometric' versus single and double-bundled 'anatomic' grafts. *J Bone Joint Surg Br.* 1998;80(1):173-9.

61. Song EK, Park HW, Ahn YS, Seon JK. Transtibial versus tibial inlay techniques for posterior cruciate ligament reconstruction: long-term follow-up study. *Am J Sports Med.* 2014;42(12):2964-71.

62. Barrett GR, Savoie FH. Operative management of acute PCL injuries with associated pathology: long-term results. *Orthopedics.* 1991;14(6):687-92.

63. Yang JH, Yoon JR, Jeong HI, Hwang DH, Woo SJ, Kwon JH, et al. Second-look arthroscopic assessment of arthroscopic single-bundle posterior cruciate ligament reconstruction: comparison of mixed graft versus achilles tendon allograft. *Am J Sports Med.* 2012;40(9):2052-60.

64. Strobel MJ, Weiler A, Schulz MS, Russe K, Eichhorn HJ. Arthroscopic evaluation of articular cartilage lesions in posterior-cruciate-ligament-deficient knees. *Arthroscopy.* 2003;19(3):262-8.

65. Skyhar MJ, Warren RF, Ortiz GJ, Schwartz E, Otis JC. The effects of sectioning of the posterior cruciate ligament and the posterolateral complex on the articular contact pressures within the knee. *J Bone Joint Surg Am.* 1993;75(5):694-9.

66. MacDonald P, Miniaci A, Fowler P, Marks P, Finlay B. A biomechanical analysis of joint contact forces in the posterior cruciate deficient knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1996;3(4):252-5.

67. Clancy WG, Jr., Shelbourne KD, Zoellner GB, Keene JS, Reider B, Rosenberg TD. Treatment of knee joint instability secondary to rupture of the posterior cruciate ligament. Report of a new procedure. *J Bone Joint Surg Am.* 1983;65(3):310-22.

68. Cross MJ, Powell JF. Long-term followup of posterior cruciate ligament rupture: a study of 116 cases. *Am J Sports Med.* 1984;12(4):292-7.
69. Dandy DJ, Pusey RJ. The long-term results of unrepaired tears of the posterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br.* 1982;64(1):92-4.
70. Keller PM, Shelbourne KD, McCarroll JR, Rettig AC. Nonoperatively treated isolated posterior cruciate ligament injuries. *Am J Sports Med.* 1993;21(1):132-6.
71. Shelbourne KD, Clark M, Gray T. Minimum 10-year follow-up of patients after an acute, isolated posterior cruciate ligament injury treated nonoperatively. *Am J Sports Med.* 2013;41(7):1526-33.
72. Logan M, Williams A, Lavelle J, Gedroyc W, Freeman M. The effect of posterior cruciate ligament deficiency on knee kinematics. *Am J Sports Med.* 2004;32(8):1915-22.
73. Hermans S, Corten K, Bellemans J. Long-term results of isolated anterolateral bundle reconstructions of the posterior cruciate ligament: a 6- to 12-year follow-up study. *Am J Sports Med.* 2009;37(8):1499-507.
74. Gill TJ, DeFrate LE, Wang C, Carey CT, Zayontz S, Zarins B, et al. The effect of posterior cruciate ligament reconstruction on patellofemoral contact pressures in the knee joint under simulated muscle loads. *Am J Sports Med.* 2004;32(1):109-15.
75. Peterfy CG, Guermazi A, Zaim S, Tirman PF, Miaux Y, White D, et al. Whole-Organ Magnetic Resonance Imaging Score (WORMS) of the knee in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage.* 2004;12(3):177-90.
76. Lexer E. *Die gesamte Wiederherstellungschirurgie.* Leipzig: Johann Ambrosius; 1931.
77. Campbell WC, Mitchell JI. Operative Treatment of Paralytic Genu Recurvatum. *Ann Surg.* 1932;96(6):1055-64.
78. Bohn CL. The treatment of traumatic genu recurvatum by corrective, subarticular osteotomy on the tibia and by bone transplantation. *Acta Orthop Scand.* 1956;25(4):310-7.
79. Lecuire F, Lerat JL, Bousquet G, Dejour H, Trillat A. [The treatment of genu recurvatum (author's transl)]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1980;66(2):95-103.
80. Moroni A, Pezzuto V, Pompili M, Zinghi G. Proximal osteotomy of the tibia for the treatment of genu recurvatum in adults. *J Bone Joint Surg Am.* 1992;74(4):577-86.

81. van Raaij TM, de Waal Malefijt J. Anterior opening wedge osteotomy of the proximal tibia for anterior knee pain in idiopathic hyperextension knees. *Int Orthop*. 2006;30(4):248-52.
82. Vicenzi G, Moroni A, Ceccarelli F, Binazzi R, Vaccari V. Tibial osteotomy in the treatment of genu recurvatum in the adult. *Ital J Orthop Traumatol*. 1986;12(4):427-32.
83. Winkler PW, Godshaw BM, Karlsson J, Getgood AMJ, Musahl V. Posterior tibial slope: the fingerprint of the tibial bone. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2021;29(6):1687-9.
84. Faschingbauer M. Editorial Commentary: Posterior Tibial Slope: The "Unknown Size" of the Knee Joint. *Arthroscopy*. 2021;37(1):250-1.
85. Faschingbauer M, Sgroi M, Juchems M, Reichel H, Kappe T. Can the tibial slope be measured on lateral knee radiographs? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014;22(12):3163-7.
86. Utzschneider S, Goettinger M, Weber P, Horng A, Glaser C, Jansson V, et al. Development and validation of a new method for the radiologic measurement of the tibial slope. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2011;19(10):1643-8.
87. Dean RS, DePhillipo NN, Chahla J, Larson CM, LaPrade RF. Posterior Tibial Slope Measurements Using the Anatomic Axis Are Significantly Increased Compared With Those That Use the Mechanical Axis. *Arthroscopy*. 2021;37(1):243-9.
88. Kessler MA, Burkart A, Martinek V, Beer A, Imhoff AB. [Development of a 3-dimensional method to determine the tibial slope with multislice-CT]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*. 2003;141(2):143-7.
89. Jahn R, Cooper JD, Juhan T, Kang HP, Bolia IK, Gamradt SC, et al. Reliability of Plain Radiographs Versus Magnetic Resonance Imaging to Measure Tibial Slope in Sports Medicine Patients: Can They Be Used Interchangeably? *Orthop J Sports Med*. 2021;9(10):23259671211033882.
90. Shao Q, MacLeod TD, Manal K, Buchanan TS. Estimation of ligament loading and anterior tibial translation in healthy and ACL-deficient knees during gait and the influence of increasing tibial slope using EMG-driven approach. *Ann Biomed Eng*. 2011;39(1):110-21.
91. Noyes FR, Butler DL, Grood ES, Zernicke RF, Hefzy MS. Biomechanical analysis of human ligament grafts used in knee-ligament repairs and reconstructions. *J Bone Joint Surg Am*. 1984;66(3):344-52.

92. Micicoi G, Jacquet C, Khakha R, LiArno S, Faizan A, Seil R, et al. Femoral and Tibial Bony Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injuries Are Present in More Than 50% of Healthy Individuals. *Am J Sports Med.* 2021;49(14):3816-24.
93. Keizer MNJ, Hijmans JM, Gokeler A, Benjaminse A, Otten E. Healthy subjects with lax knees use less knee flexion rather than muscle control to limit anterior tibia translation during landing. *J Exp Orthop.* 2020;7(1):32.
94. Zee MJM, Keizer MNJ, Dijkerman L, van Raaij J, Hijmans JM, Diercks RL. The correlation between posterior tibial slope and dynamic anterior tibial translation and dynamic range of tibial rotation. *J Exp Orthop.* 2021;8(1):71.
95. Boden BP, Sheehan FT. Mechanism of non-contact ACL injury. *J Orthop Res.* 2021.
96. Wang D, Kent RN, 3rd, Amirtharaj MJ, Hardy BM, Nawabi DH, Wickiewicz TL, et al. Tibiofemoral Kinematics During Compressive Loading of the ACL-Intact and ACL-Sectioned Knee: Roles of Tibial Slope, Medial Eminence Volume, and Anterior Laxity. *J Bone Joint Surg Am.* 2019;101(12):1085-92.
97. Tamimi I, Ballesteros J, Lara AP, Tat J, Alaqueel M, Schupbach J, et al. A Prediction Model for Primary Anterior Cruciate Ligament Injury Using Artificial Intelligence. *Orthop J Sports Med.* 2021;9(9):23259671211027543.
98. Bernhardson AS, Aman ZS, Dornan GJ, Kemler BR, Storaci HW, Brady AW, et al. Tibial Slope and Its Effect on Force in Anterior Cruciate Ligament Grafts: Anterior Cruciate Ligament Force Increases Linearly as Posterior Tibial Slope Increases. *Am J Sports Med.* 2019;47(2):296-302.
99. Brandon ML, Haynes PT, Bonamo JR, Flynn MI, Barrett GR, Sherman MF. The association between posterior-inferior tibial slope and anterior cruciate ligament insufficiency. *Arthroscopy.* 2006;22(8):894-9.
100. Wang YL, Yang T, Zeng C, Wei J, Xie DX, Yang YH, et al. Association Between Tibial Plateau Slopes and Anterior Cruciate Ligament Injury: A Meta-analysis. *Arthroscopy.* 2017;33(6):1248-59.e4.
101. Wordeman SC, Quatman CE, Kaeding CC, Hewett TE. In vivo evidence for tibial plateau slope as a risk factor for anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2012;40(7):1673-81.
102. Bayer S, Meredith SJ, Wilson KW, de Sa D, Pauyo T, Byrne K, et al. Knee Morphological Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury: A Systematic Review. *J Bone Joint Surg Am.* 2020;102(8):703-18.



103. Bernhardson AS, DePhillipo NN, Daney BT, Kennedy MI, Aman ZS, LaPrade RF. Posterior Tibial Slope and Risk of Posterior Cruciate Ligament Injury. *Am J Sports Med.* 2019;47(2):312-7.
104. Liu W, Maitland ME. Influence of anthropometric and mechanical variations on functional instability in the ACL-deficient knee. *Ann Biomed Eng.* 2003;31(10):1153-61.
105. Napier RJ, Garcia E, Devitt BM, Feller JA, Webster KE. Increased Radiographic Posterior Tibial Slope Is Associated With Subsequent Injury Following Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthop J Sports Med.* 2019;7(11):2325967119879373.
106. Bernhardson AS, Aman ZS, DePhillipo NN, Dornan GJ, Storaci HW, Brady AW, et al. Tibial Slope and Its Effect on Graft Force in Posterior Cruciate Ligament Reconstructions. *Am J Sports Med.* 2019;47(5):1168-74.
107. Winkler PW, Wagala NN, Carrozzi S, Nazzal EM, Fox MA, Hughes JD, et al. Low posterior tibial slope is associated with increased risk of PCL graft failure. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2022.
108. Weiler A, Gwinner C, Wagner M, Ferner F, Strobel MJ, Dickschas J. Significant slope reduction in ACL deficiency can be achieved both by anterior closing-wedge and medial open-wedge high tibial osteotomies: early experiences in 76 cases. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2022;30(6):1967-75.
109. Queiros CM, Abreu FG, Moura JL, de Abreu GV, Vieira TD, Helfer L, et al. Anterior Closing-Wedge Osteotomy for Posterior Slope Correction With Tibial Tubercle Preservation. *Arthrosc Tech.* 2019;8(10):e1105-e9.
110. DePhillipo NN, Kennedy MI, Dekker TJ, Aman ZS, Grantham WJ, LaPrade RF. Anterior Closing Wedge Proximal Tibial Osteotomy for Slope Correction in Failed ACL Reconstructions. *Arthrosc Tech.* 2019;8(5):e451-e7.
111. Akoto R, Alm L, Drenck TC, Frings J, Krause M, Frosch KH. Slope-Correction Osteotomy with Lateral Extra-articular Tenodesis and Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Is Highly Effective in Treating High-Grade Anterior Knee Laxity. *Am J Sports Med.* 2020;48(14):3478-85.
112. Dejour D, Saffarini M, Demey G, Baverel L. Tibial slope correction combined with second revision ACL produces good knee stability and prevents graft rupture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2015;23(10):2846-52.

113. Song GY, Ni QK, Zheng T, Zhang ZJ, Feng H, Zhang H. Slope-Reducing Tibial Osteotomy Combined With Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Produces Improved Knee Stability in Patients With Steep Posterior Tibial Slope, Excessive Anterior Tibial Subluxation in Extension, and Chronic Meniscal Posterior Horn Tears. *Am J Sports Med.* 2020;48(14):3486-94.
114. Hees T, Petersen W. Anterior Closing-Wedge Osteotomy for Posterior Slope Correction. *Arthroscopy techniques.* 2018;7(11):e1079-e87.
115. Bongbong DN, Oeding JF, Ma CB, Pedroia V, Lansdown DA. Multiple Tibiofemoral Bone Shapes Predict Outcomes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Arthroscopy.* 2021.
116. Imhoff FB, Mehl J, Comer BJ, Obopilwe E, Cote MP, Feucht MJ, et al. Slope-reducing tibial osteotomy decreases ACL-graft forces and anterior tibial translation under axial load. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(10):3381-9.
117. Yamaguchi KT, Cheung EC, Markolf KL, Boguszewski DV, Mathew J, Lama CJ, et al. Effects of Anterior Closing Wedge Tibial Osteotomy on Anterior Cruciate Ligament Force and Knee Kinematics. *Am J Sports Med.* 2018;46(2):370-7.
118. Dye SF. Functional morphologic features of the human knee: an evolutionary perspective. *Clin Orthop Relat Res.* 2003(410):19-24.
119. Schultze H-P, Trueb L. Review of E. Jarvik, 'Basic Structure and Evolution of Vertebrates'. *Journal of Vertebrate Paleontology.* 1981;1(3-4):389-97.
120. Haines RW. The tetrapod knee joint. *J Anat.* 1942;76(Pt 3):270-301.
121. McNeill Ingham SJ, de Carvalho RT, Abdalla RJ, Fu FH, Lovejoy CO. Bony Morphology: Comparative Anatomy and its Importance for the Anterior Cruciate Ligament. *Operative Techniques in Orthopaedics.* 2017;27(1):2-7.
122. Dewolf AH, Ivanenko YP, Mesquita RM, Willems PA. Postural control in the elephant. *J Exp Biol.* 2021;224(22).
123. McGee-Lawrence M, Buckendahl P, Carpenter C, Henriksen K, Vaughan M, Donahue S. Suppressed bone remodeling in black bears conserves energy and bone mass during hibernation. *J Exp Biol.* 2015;218(Pt 13):2067-74.
124. McGee-Lawrence ME, Wojda SJ, Barlow LN, Drummer TD, Bunnell K, Auger J, et al. Six months of disuse during hibernation does not increase intracortical porosity or decrease cortical bone geometry, strength, or mineralization in black bear (*Ursus americanus*) femurs. *J Biomech.* 2009;42(10):1378-83.



## Danksagung

Zu aller erst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka, ärztlicher Direktor des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie, für das anhaltende Vertrauen und die kontinuierliche Unterstützung bedanken.

Ebenso möchte ich Herrn Dr. Tobias Jung und Herrn Prof. Dr. Andreas Weiler für die gute wissenschaftliche Zusammenarbeit danken.

Ich möchte mich auch bei allen Patienten für die Zeit und ihr Entgegenkommen im Zusammenhang mit den durchgeführten Studien bedanken.

Zuletzt danke ich meiner Frau Imke Schatka und unseren Kindern Johan und Paul. Ohne Euer Verständnis, wissenschaftliche Mitarbeit, andauernde Motivation und unser erfüllendes Familienleben wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Euch möchte ich diese Arbeit widmen.

# Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

---

Datum

---

Unterschrift