

Aus dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Die passive tibiofemorale Rotationsstabilität bei Patienten mit
Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes
– eine prospektive Analyse der *in vivo* Kinematik

Passive tibiofemoral rotational stability in patients
undergoing reconstruction of the posterior cruciate ligament
- a prospective analysis of *in vivo* kinematics

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Stephan Christoph Johannes Oehme

aus Göttingen

Datum der Promotion: 26.06.2022

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
TABELLENVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
ZUSAMMENFASSUNG	IX
ABSTRACT (ENGLISH)	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 EINFÜHRUNG	1
1.2 DIE VERLETZUNG DES HINTEREN KREUZBANDES	2
1.2.1 EPIDEMIOLOGIE	2
1.2.2 VERLETZUNGSMECHANISMEN	2
1.3 ANATOMIE UND BIOMECHANIK	3
1.3.1 ANATOMIE DES HINTEREN KREUZBANDES	3
1.3.2 BIOMECHANIK UND PATHOBIOMECHANIK DES HINTEREN KREUZBANDES	5
1.3.3 ANATOMIE DER POSTEROLATERALEN GELENKECKE	8
1.3.4 BIOMECHANIK UND PATHOBIOMECHANIK DER POSTEROLATERALEN GELENKECKE	10
1.4 DIAGNOSTIK	11
1.4.1 ANAMNESE	11
1.4.2 KLINISCHE UNTERSUCHUNG & FUNKTIONSTESTS	12
1.4.3 APPARATIVE VERFAHREN	17
1.4.4 BILDGEBENDE VERFAHREN	18
1.4.5 ARTHROSKOPIE	19
1.5 KLASSIFIKATION	21
1.6 THERAPIE	22
1.6.1 KONSERVATIVE THERAPIE	22
1.6.2 OPERATIVE THERAPIE	23
1.7 ZIELE UND MOTIVATION DER ARBEIT	26

2 MATERIAL UND METHODEN	28
2.1 PATIENTENKOLLEKTIV	28
2.2 OPERATIVE VERSORGUNG	31
2.2.1 REKONSTRUKTION DES HINTEREN KREUZBANDES	32
2.2.2 STABILISIERUNG DER POSTEROLATERALEN GELENKECKE	34
2.2.4 NACHBEHANDLUNGSPROTOKOLL	35
2.3 SUBJEKTIVE BEURTEILUNG DURCH FRAGEBÖGEN	36
2.3.1 IKDC 2000 – FORMBLATT ZUR SUBJEKTIVEN BEURTEILUNG DES KNIES	36
2.3.2 LYSHOLM SCORE	37
2.3.3 KNEE INJURY AND OSTEOARTHRITIS OUTCOME SCORE (KOOS)	37
2.3.4 SF-36	37
2.4 BILDGEBUNG	38
2.4.1 STRESSRADIOGRAPHIE	38
2.4.2 MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE	39
2.5 ERMITTLUNG DER TIBIOFEMORALEN ROTATIONSSTABILITÄT	41
2.5.1 KNEE ROTOMETER	41
2.5.2 FLUOROSKOPISCH BASIERTE ERMITTLUNG DER TIBIOFEMORALEN <i>IN VIVO</i> ROTATION	45
2.5.3 DARSTELLUNG DER TIBIOFEMORALEN ROTATIONSSTABILITÄT	47
2.6 STATISTIK UND DATENANALYSE	49
3 ERGEBNISSE	50
3.1 AUSWERTUNG DES PATIENTENKOLLEKTIVS	50
3.1.1 EPIDEMIOLOGIE	50
3.1.2 UNFALLURSACHE	51
3.2 AUSWERTUNG DER SUBJEKTIVEN KNIEBEURTEILUNG DURCH FRAGEBÖGEN	52
3.2.1 IKDC 2000 – FORMBLATT ZUR SUBJEKTIVEN BEURTEILUNG DES KNIES	52
3.2.2 LYSHOLM SCORE	53
3.2.3 KNEE INJURY AND OSTEOARTHRITIS OUTCOME SCORE (KOOS)	54
3.2.4 SF-36	56
3.3 AUSWERTUNG DER GEHALTENEN RÖNTGENAUFNAHMEN	57
3.4 AUSWERTUNG DER TIBIOFEMORALEN ROTATIONSSTABILITÄT DER GESAMTKOHORTE	57
3.4.1 ANALYSE DER GESAMTKOHORTE BEI 90° KNIEFLEXION	57
3.4.1 ANALYSE DER GESAMTKOHORTE BEI 60° KNIEFLEXION	58
3.4.3 ANALYSE DER GESAMTKOHORTE BEI 30° KNIEFLEXION	59

3.5	AUSWERTUNG DER TIBIOFEMORALEN ROTATIONSSTABILITÄT DER SUBGRUPPEN	60
3.5.1	ANALYSE DER SUBGRUPPEN BEI 90° KNIEFLEXION	60
3.5.2	ANALYSE DER SUBGRUPPEN BEI 60° KNIEFLEXION	62
3.5.3	ANALYSE DER SUBGRUPPEN BEI 30° KNIEFLEXION	63
4	DISKUSSION	64
4.1	SUBJEKTIVE BEURTEILUNG DURCH FRAGEBÖGEN	64
4.1.1	IKDC 2000 – FORMBLATT ZUR SUBJEKTIVEN BEURTEILUNG DES KNIES	64
4.1.2	LYSHOLM SCORE	65
4.1.3	KNEE INJURY AND OSTEOARTHRITIS OUTCOME SCORE (KOOS)	65
4.1.4.	SF-36	66
4.2	AP-STABILITÄT	67
4.3	TIBIOFEMORALE ROTATIONSSTABILITÄT	69
4.3.1	TIBIOFEMORALE ROTATIONSSTABILITÄT DER ANALYSIERTEN PATIENTENKOHORTE	69
4.3.2	DIAGNOSTIK DER TIBIOFEMORALEN AUßENROTATIONSINSTABILITÄT	76
4.4	LIMITATIONEN DER ARBEIT	79
5	ZUSAMMENFASSUNG	80
6	ANHANG	82
6.1	LITERATURVERZEICHNIS	82
6.2	EIDESSTÄTLICHE VERSICHERUNG	96
6.3	LEBENS LAUF	97
6.4	VERÖFFENTLICHUNGEN	98
6.5	DANKSAGUNG	99
6.6	BESCHEINIGUNG STATISTIK	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation der HKB-Insuffizienz nach Harner	22
Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien	28
Tabelle 3: Epidemiologische Daten der untersuchten Patientenkohorte	50
Tabelle 4: Unfallursache der untersuchten Patientenkohorte	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht von anterior und posterior auf das native hintere Kreuzband.....	5
Abbildung 2: Strukturen der posterolateralen Gelenkecke	9
Abbildung 3: Anatomisches Präparat mit den drei in der Tiefe befindlichen wichtigsten statischen Stabilisatoren der posterolateralen Gelenkecke	10
Abbildung 4: Posterior sag sign.....	12
Abbildung 5: Step-off-Test.....	13
Abbildung 6: Posterior-Drawer-Test.....	14
Abbildung 7: Hyperextensionstest.....	14
Abbildung 8: Dial-Test	16
Abbildung 9: Arthroskopische Evaluation der HKB Insuffizienz und der posterolateralen Instabilität	20
Abbildung 10: Flow Chart der Analyse des Patientenkollektivs	30
Abbildung 11: Anzahl der Patienten nach Art der Bandrekonstruktionen	31
Abbildung 12: 5-fach gelegtes HKB Transplantat mit Polyaktid-Kugel.....	32
Abbildung 13: A) tibiale Fixierung mit Interferenzschraube und Postfixation über Knochenbrücke B) femorale Fixierung mit Interferenzschraube C) femorale Fixierung über Endobutton System	33
Abbildung 14: Arthroskopieportale der HKB-Rekonstruktion	33
Abbildung 15: Stabilisierung der posterolateralen Gelenkecke in nach Strobel modifizierter Technik nach Larson	35
Abbildung 16: Die PTS-Orthese immobilisiert das Kniegelenk in Extensionsstellung ...	36
Abbildung 17: Haltegerät für gehaltene Röntgenaufnahmen nach Prof. Dr. Scheuba...	38
Abbildung 18: Auswertung der HSL nach Jacobsen	39
Abbildung 19: Sagittale T1-gewichtete MRT-Aufnahme einer HKB-Ruptur	40
Abbildung 20: Am Julius Wolff Institut entwickelter und evaluierter Knie Rotometer....	41
Abbildung 21: Vacoped zur Fixierung des Unterschenkels.....	42
Abbildung 22: Seilzugvorrichtung des Knie Rotometer zur Applizierung eines axialen Drehmomentes auf die Rotationsplattform und damit auf das Kniegelenk.....	42
Abbildung 23: Synchrone Fluoroskopie der tibiofemorale Rotation	44
Abbildung 24: Workflow zur Ermittlung kinematischer <i>in vivo</i> Daten aus MRT-Daten und Fluoroskopie.....	45
Abbildung 25: 3D-Rekonstruktion der individuellen Gelenkanatomie	46

Abbildung 26: Fluoroskopieaufnahmen mit erstellter und angepasster 3D-Gelenkrekonstruktion in Ausgangsposition (A) und tibiofemoraler Außenrotation (B) ...	47
Abbildung 27: Gegenübergestellte Hysteresen eines Probanden	48
Abbildung 28: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit anhand des IKDC 2000 Score präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)	52
Abbildung 29: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit anhand des Lysholm Score präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)	53
Abbildung 30: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit anhand der KOOS Gesamtpunktzahl präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)	54
Abbildung 31: Auswertung der KOOS Subkategorien.....	55
Abbildung 32: Auswertung des SF-36 Fragebogen inklusive Subkategorien.....	56
Abbildung 33: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 90° Knieflexion.....	57
Abbildung 34: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 60° Knieflexion.....	58
Abbildung 35: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 30° Knieflexion.....	59
Abbildung 36: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 90° Knieflexion	60
Abbildung 37: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 60° Knieflexion	62
Abbildung 38: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 30° Knieflexion	63

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
AMP	Anteromediales Portal
AL-Bündel	Anterolaterales Bündel
AP	Anterior-Posterior
BMI	Body-Mass-Index
DOF	Degrees of freedom
DOM	Dorsomediales Portal
F/U	Follow up
HALP	Hohes anterolaterales Portal
HKB	Hinteres Kreuzband
HSL	Hintere Schublade
IKDC	International Knee Documentation Committee
JWI	Julius Wolff Institut
KOOS	Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score
LCL	Ligamentum collaterale laterale
LED	Leuchtdiode
Lig.	Ligamentum
M.	Musculus
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunden
MW	arithmetischer Mittelwert
Nm	Newtonmeter
N	Newton
ns	Nanosekunden
PLRI	Posterolaterale Instabilität
PLS	Posterolaterale Stabilisierung
PM-Bündel	Posteromediales Bündel
PTS-Orthese	Posterior tibial support-Orthese
SARA	symmetrical axis of rotation approach
SD	Standardabweichung
SF-36	Short Form Health 36

SSD	Side-to-side Differenz
TALP	Tiefes anterolaterales Portal
VKB	Vorderes Kreuzband
VSL	Vordere Schublade
ZIB	Zuse Institut Berlin

Zusammenfassung

Einleitung:

Neben seiner primären Funktion als posteriorer Stabilisator im Tibiofemoralgelenk ist das hintere Kreuzband (HKB) sekundärer Stabilisator für die Rotationsstabilität. In der vorliegenden klinischen, prospektiven Studie wurde die passive *in vivo* Rotationsstabilität des Tibiofemoralgelenkes sowohl von HKB-insuffizienten Kniegelenken im Vergleich zum gesunden kontralateralen Kniegelenk als auch im Verlauf nach kombinierter oder isolierter HKB-Rekonstruktion analysiert.

Methodik:

13 Patienten (11m, 2w; $\bar{\text{ø}}36,8\text{J}$; Bereich 18-48J) mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB und gesundem kontralateralem Kniegelenk wurden eingeschlossen. Die Analyse der passiven tibiofemoralen Rotationsstabilität erfolgte an einer am Julius Wolff Institut (JWI) entwickelten und evaluierten Vorrichtung unter Darstellung der 3D-*in-vivo* Rotation der Gelenkpartner bei einem Drehmoment von 3 Nm. Die Patienten wurden präoperativ sowie 6 und 12 Monate postoperativ bei einem Knieflexionswinkel von 90°, 60° und 30° untersucht. Zusätzlich wurde die Stressradiographie zur Analyse der anterioren und posterioren (AP) Stabilität sowie eine subjektive Analyse durch Fragebögen durchgeführt (KOOS, IKDC 2000, Lysholm, SF-36).

Ergebnisse und Schlussfolgerung:

Erstmalig konnte in einer prospektiven Studie die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten mit Rekonstruktion des HKB direkt, quantitativ und objektiv *in vivo* dargestellt werden. Patienten mit kombinierter oder isolierter Rekonstruktion des HKB zeigten präoperativ eine signifikant erhöhte Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden Gegenseite. Nach erfolgter Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer posterolateralen Stabilisierung (PLS) konnte eine Reduktion der Außenrotationsinstabilität beschrieben werden. Nach erfolgter Rekonstruktion des HKB ohne PLS zeigte sich keine Reduktion der Außenrotationsinstabilität. Eine standardisierte, objektivierbare Methode zur Messung der tibiofemoralen Rotationsstabilität zusätzlich zur Messung der hinteren Schublade kann eine sinnvolle Ergänzung der klinischen Diagnostik und Therapieentscheidung sein.

Abstract (english)

Introduction:

In addition to its primary function as the posterior stabilizer of the tibiofemoral joint, the posterior cruciate ligament (PCL) is also secondary stabilizer for rotational stability. In the present prospective clinical study, the passive *in vivo* rotational stability of the tibiofemoral joint was analyzed in PCL-deficient knee joints in comparison to the healthy contralateral knee joint and after combined or isolated PCL reconstruction.

Methods:

13 patients (11m, 2f; $\bar{\text{age}} 36.8\text{J}$; range 18-48J) with single bundle reconstruction of the PCL and healthy contralateral knee joint were included. The analysis of passive tibiofemoral rotational stability was performed on a device developed and evaluated at the Julius Wolff Institute (JWI), showing the 3D-in-vivo rotation of the joint partners. A torque of 3 Nm was applied to the joint. Patients were examined preoperatively and at a follow up of 6 and 12 months postoperatively at knee flexion angles of 90°, 60° and 30°. Stress radiography was performed to analyze the anterior-posterior stability and a subjective analysis was performed by following scores: KOOS, IKDC 2000, Lysholm, SF-36.

Results and conclusion:

For the first time the passive tibiofemoral rotational stability of patients undergoing PCL reconstruction could be demonstrated directly, quantitatively and objectively in a prospective *in vivo* study. Patients with combined or isolated reconstruction of the PCL showed preoperatively a significant higher instability in external rotational of the injured knee joint compared to the healthy contralateral side. A reduction of the external rotational instability could be observed after PCL reconstruction with posterolateral stabilization (PLS). No reduction in external rotational instability was observed after reconstruction of the PCL without PLS. A standardized, objective method for measuring tibiofemoral rotational stability in addition to the measurement of the anterior-posterior stability can thus be a useful addition to clinical diagnostics and for therapy decisions.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Verletzungen des hinteren Kreuzbandes (HKB) zählen zu den schweren Verletzungen des Kapselbandapparates des Kniegelenkes und treten oft in Kombination mit weiteren Läsionen des Kniegelenkes auf. Somit stellt sie für den Patienten eine schwerwiegende Knieverletzung dar, welche im Verlauf mit einem deutlich höherem Gonarthrosrisiko assoziiert ist.^{1,2}

In den letzten Jahren zeigt sich ein zunehmendes wissenschaftliches Interesse bezüglich HKB Verletzungen.³ Dennoch sind die Ergebnisse der operativen Rekonstruktion des HKB nicht gänzlich zufriedenstellend. In diesem Zusammenhang beschäftigen sich eine Vielzahl von Studien mit der anterioren und posterioren (AP) Stabilität von HKB-insuffizienten und rekonstruierten Kniegelenken. Über deren Rotationsstabilität ist allerdings wenig bekannt. Die Rotationsstabilität stellt jedoch einen wichtigen Faktor einer isolierten oder kombinierten HKB-Verletzung dar.⁴ Das HKB ist neben seiner Funktion als primärer posteriorer Stabilisator des Tibiofemoralgelenkes auch sekundärer Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation.⁵⁻⁹ Zusätzlich kommen Verletzungen der posterolateralen Gelenkecke, dem Hauptstabilisator der tibiofemorale Außenrotation in ca. 37 - 62 % der HKB-Verletzungen vor.¹⁰⁻¹⁴ In der Diagnostik von HKB-Verletzungen stellt die Stressradiographie den Goldstandard zur direkten und objektiven Beurteilung der AP-Stabilität des Tibiofemoralgelenkes dar.¹⁵ Ein standardisiertes Verfahren zur direkten, objektiven Beurteilung der Rotationsstabilität existiert derzeit nicht. Im klinischen Alltag findet die Bestimmung der tibiofemorale Rotationsstabilität durch indirekte, untersucherabhängige, manuell durchgeführten Funktionstests statt. Daher soll in der vorliegenden prospektiven Studie erstmalig die passive *in vivo* Rotationsstabilität des Tibiofemoralgelenkes sowohl von HKB-insuffizienten Kniegelenken im Vergleich zum gesunden, kontralateralen Kniegelenk, als auch im Verlauf nach kombinierter oder isolierter HKB-Rekonstruktion in einem direkten und objektiven Verfahren dargestellt und analysiert werden.

1.2 Die Verletzung des hinteren Kreuzbandes

1.2.1 Epidemiologie

Die Ruptur des HKB ist eine seltene Verletzung. Die Angaben zur Häufigkeit einer HKB-Verletzung bei einer Kapselbandverletzung des Kniegelenkes variiert in der Literatur zwischen 1-44 % und ist abhängig vom untersuchten Patientengut und von der Definition als isolierte oder kombinierte HKB-Verletzung.^{1,10,11,16-19} Isolierte HKB-Verletzungen machen zwischen 6,5 - 69,1 % der Gesamtzahl der Knieverletzungen mit Beteiligung des HKB aus.^{11,14,16,17} Sanders et al. ermittelten eine auf die Allgemeinbevölkerung bezogene 1-Jahres-Inzidenz von 1,8 isolierten HKB-Rupturen pro 100.000 Personen.¹ Majewski et al. untersuchten 2763 Patienten mit einem durch eine Sportverletzung verursachten Kniebinnenschaden und beschreiben einen Anteil von 1,45 % mit Verletzung des HKB.¹⁹ Fanelli et al. geben in ihrem untersuchten Patientengut von 222 Traumapatienten mit akuter Knieverletzung und Hämarthros einen Anteil von 38,5 % mit HKB-Verletzung an.¹⁶ Davon lagen 93,5 % kombiniert mit weiteren ligamentären Verletzungen vor. Schlumberger et al. konnten in ihrer Analyse von 1000 HKB-Rekonstruktionen einen Anteil von 47 % isolierter HKB-Rekonstruktionen ermitteln. Dabei war bei HKB-Verletzungen beim Handball der Anteil der isolierten HKB-Verletzungen mit 69,1 % am höchsten. Ähnlich wie Fanelli et al. konnten Schlumberger et al. auch einen Anteil von 91,7 % kombinierter HKB-Verletzungen nach Autounfällen nachweisen. Owsen et al. geben in ihrer Analyse basierend auf den scandinavian knee ligament Registern den Anteil der operativ versorgten isolierten HKB-Verletzungen mit 26 - 37 % gegenüber allen operativ versorgten HKB-Verletzungen an.¹⁷ Schulz et al. geben in der von ihnen untersuchten Patientengruppe von 494 Patienten mit HKB-Verletzung den Anteil der isolierten HKB-Verletzungen basierend auf der Klassifikation der Stressradiographie mit 47 % an.¹¹ Das Durchschnittsalter von Patienten mit einer HKB-Verletzung liegt bei 27,5 - 33,4 Jahren.^{1,11,17,20} Männer sind im Verhältnis 3:1 häufiger betroffen als Frauen.^{1,17,21}

1.2.2 Verletzungsmechanismen

Der klassische Verletzungsmechanismus einer HKB-Verletzung ist das prätibiale Anpralltrauma bei gebeugtem Kniegelenk (dashboard injury). Bei gebeugtem Kniegelenk und einer nach posterior gerichteten Kraft auf die Tibia nimmt das HKB die gesamte Unfallenergie auf, da das HKB die dorsale Translation der Tibia gegenüber dem Femur

inhibiert und die sekundären ligamentären Kniegelenksstabilisatoren in dieser Position entspannt sind.²² Je nach Größe der einwirkenden Kraft kommt es so zur isolierten Verletzung des HKB oder auch zur kombinierten Verletzung, vorwiegend mit Strukturen der posterolateralen Gelenkecke.^{12,23,24} So ereignen sich laut Schulz et al. 45 % aller HKB-Verletzungen durch einen Verkehrsunfall. Alleine durch Motorradunfälle werden 28 % aller HKB-Verletzungen verursacht.¹¹ In Ländern mit einer höheren Motorradichte ist dieser Anteil noch wesentlich höher.²⁵ Ein weiterer Unfallmechanismus sind Stürze auf das gebeugte Kniegelenk. Dieser Unfallmechanismus kommt vor allem bei sportlichen Aktivitäten vor. So entstehen 39 % - 49 % der HKB-Verletzungen während sportlicher Aktivitäten, dabei geschieht dies mit etwa 13 - 25 % aller HKB-Verletzungen beim Fußball am häufigsten.^{11,14,17} Der Torwart nimmt hierbei eine besonders gefährdete Position ein.¹¹ Da hier meistens keine so großen Kräfte wirken, wie bei einem Verkehrsunfall, kommen hier vermehrt isolierte HKB-Verletzungen vor. Weiterhin kann auch ein Hyperextensionstrauma oder ein Rotationstrauma vor allem in Verbindung mit einem Varusstress zur Ruptur des HKB führen.²⁶

1.3 Anatomie und Biomechanik

1.3.1 Anatomie des hinteren Kreuzbandes

Das HKB ist phylogenetisch von posterior in das Kniegelenk eingewandert. Es befindet sich somit innerhalb der pars fibrosa der Gelenkkapsel.²⁷ Es wird ventral, medial und lateral von Synovia bedeckt. Posterior des HKB befindet sich eine Synovialduplikatur. Demzufolge liegt das HKB intrakapsulär, aufgrund seiner retrosynovialen Lage jedoch extraartikulär.²⁸ Es entspringt an der Innenseite der medialen Femurkondyle und verläuft posterolateral zu seiner Insertion an der dorsalen, proximalen Tibia, etwa 10 mm unterhalb des Tibiaplateaus. Der femorale Ursprung ist halbmondförmig und hat eine durchschnittliche Größe von 209 mm².²⁹ Er hat eine durchschnittliche Länge von 38 mm und eine durchschnittliche Breite von 13 mm.³⁰ Das HKB kann in zwei separate Bündel unterteilt werden, das kräftigere AL-Bündel und das schwächere PM-Bündel.³¹ Das AL-Bündel entspringt im oberen, anterioren Anteil des femoralen Ursprungs des HKB und zieht zum lateralen Anteil der tibialen Insertionsfläche. Der femorale Ursprung des AL-Bündels hat eine Fläche von 118 mm².²⁹ Das PM-Bündel entspringt im unteren, posterioren Bereich des femoralen Ursprungs und zieht zum medialen Anteil der tibialen

Insertionsfläche. Seine Ursprungsfläche am Femur misst 90 mm².²⁹ Die gesamte tibiale Insertionsfläche beträgt durchschnittlich 243 mm², wovon die Insertionsfläche des AL-Bündels 93 mm² und die des PM-Bündels 150 mm² ausmachen.³² Das HKB wird von einem oder zwei inkonstant vorkommenden meniskofemorale Ligamenten begleitet. Sowohl das Lig. meniskofemorale anterius (Humphrey Ligament), als auch das Lig. meniskofemorale posterius (Wrisberg Ligament) entspringen an der Innenseite des medialen Femurkondylus und inserieren am posteriomedialen Anteil des Hinterhorns des Außenmeniskus. Das Lig. meniskofemorale anterius (aMFL) inseriert dabei anterior und das Lig. meniskofemorale posterius (pMFL) posterior des HKB. Angaben zur Häufigkeit der meniskofemorale Ligamente variieren in der Literatur. Gupte et al. untersuchten 84 Kniegelenke, in denen sie in 93 % mindestens ein meniskofemorales Ligament vorfanden. In 74 % der Gelenke wurde ein aMFL, in 69 % ein pMFL und in 50 % beide meniskofemorale Ligamente vorgefunden.³³ Andere Studien berichten von einer Prävalenz von 71 % - 100 % für das Vorhandensein eines meniskofemorale Ligaments (Abb. 1).³⁴⁻³⁷

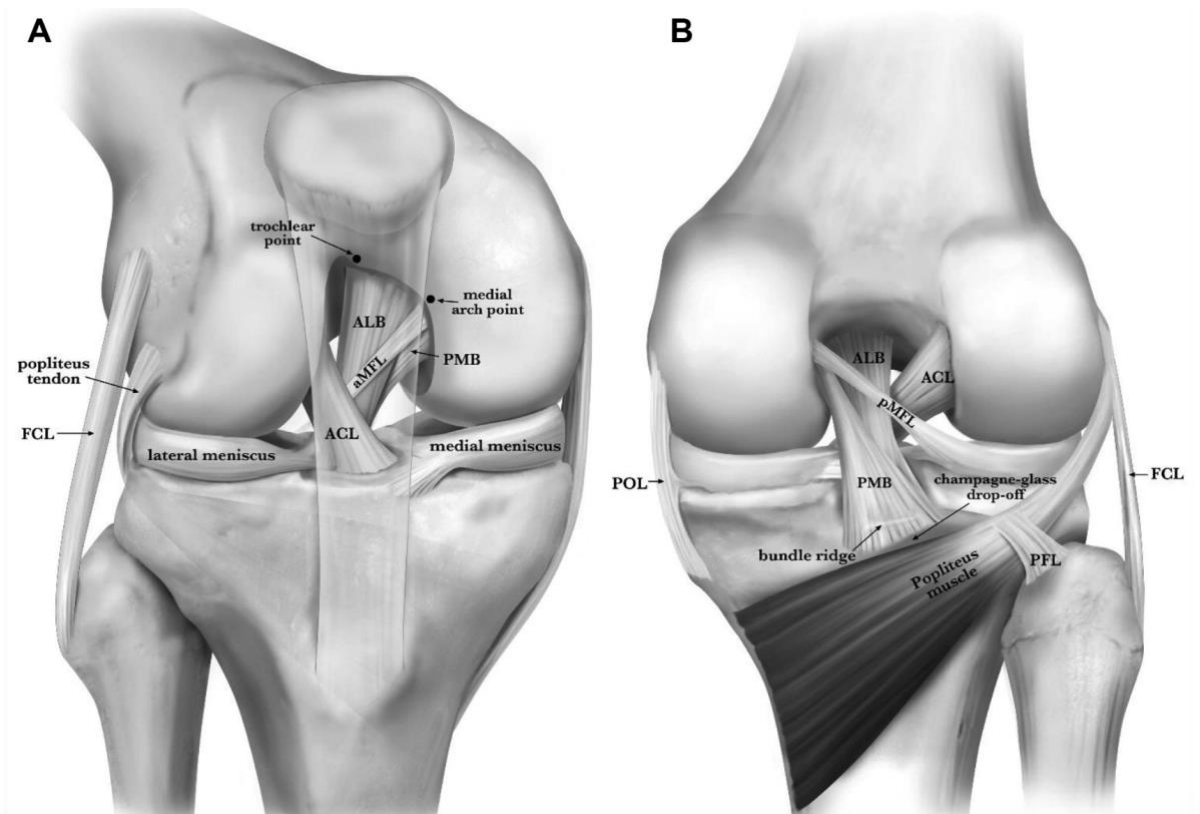


Abbildung 1: Ansicht von anterior (A) und posterior (B) auf das native hintere Kreuzband (HKB) - Anterolaterales Bündel (ALB), posteromediales Bündel (PMB), Lig. meniskofemorale posterius (pMFL), Lig. meniskofemorale anterius (aMFL), Lig. cruciatum anterius (ACL), FCL (fibular collateral ligament = Lig. collaterale laterale), PFL (popliteofibular ligament), POL (posterior oblique ligament)³⁸

Das HKB wird über die A. poplitea, und zwar proximal über Endäste der A. genus media und distal über die Endäste der Aa. genus inferiores medialis und lateralis vaskularisiert.³⁹ Das HKB gilt als sehr gut vaskularisiert, womit auch die gute Heilungstendenz begründet wird. Jedoch gibt es im Verlauf des HKB Unterschiede in der Vaskularisation. So sind die proximalen und distalen Anteile besser vaskularisiert als der zentrale Anteil des HKB.⁴⁰ Weiterhin konnten im HKB zahlreiche freie Nervenendigungen für die Schmerzrezeption und Ruffini-Körperchen, sowie Golgi-Sehnen Apparate für die Propriozeption nachgewiesen werden.^{41,42}

1.3.2 Biomechanik und Pathobiomechanik des hinteren Kreuzbandes

Das HKB ist das kräftigste Ligament im Kniegelenk mit einer beschriebenen Reißfestigkeit von durchschnittlich 739 – 1627 N.^{43,44} Es ist der primäre Stabilisator gegen die dorsale Verschiebung der Tibia gegenüber dem Femur. Diese Stabilisierungsfunktion gewinnt mit Zunahme der Knieflexion an Bedeutung und erreicht

Ihre maximale Funktion bei 90° Kniebeugung.⁴⁵ In dieser Position konnten Charbonnier et al. die maximale Längenzunahme des HKB innerhalb ihrer MRT-basierten *in vivo* Studie nachweisen.⁴⁶

Die isolierte Durchtrennung des HKB resultiert in einer Kadaverstudie von Kennedy et al. bei 90°Knieflexion und einer nach posterior gerichteten Kraft von 134 N, in einer durchschnittlich größeren hinteren Schublade von 11,7 mm.⁴⁷ Auch andere Studien kamen zu ähnlichen Ergebnissen.^{43,48–50} Die isolierte Durchtrennung vom AL-Bündel oder vom PM-Bündel resultiert dagegen nur in eine sehr geringe Zunahme der dorsalen Schublade.^{47,51} Das AL-Bündel ist das größere der beiden Bündel mit einer durchschnittlichen Querschnittsfläche von 43 mm² und einer Reißfestigkeit von 1620 N. Das PM-Bündel ist das kleinere Bündel mit einer durchschnittlichen Querschnittsfläche von 10 mm² und einer Reißfestigkeit von 258 N.³¹ Das AL-Bündel ist in 90° Knieflexion gespannt und in Extension entspannt. Das PM-Bündel ist in Extension, so wie in maximaler Kniebeugung gespannt und bei 90° Knieflexion entspannt.⁵² Früher ging man aufgrund dieser Erkenntnisse von einer eher unterschiedlichen Funktion der einzelnen Bündel aus.^{30,53} Ahmad et al. konnten aber die Funktion der beiden Bündel als synergistische Partner für die posteriore Stabilisierung des Tibiofemoralgelenkes darstellen.⁵⁴

Zusätzlich zum HKB stabilisieren auch die meniskofemorale Ligamente das Tibiofemoralgelenk nach posterior.⁴³ Gupte et al. zeigten, dass die meniskofemorale Bänder mit einem Anteil von 28 % zur Stabilisierung des Tibiofemoralgelenkes entgegen einer nach posterior gerichteten Kraft beitragen. Im Zustand mit vollständig durchtrenntem HKB, lag dieser Anteil sogar bei 71 %.⁵⁵

Neben seiner Funktion als primärer posteriorer Stabilisator, gilt das HKB auch als sekundärer Stabilisator der Außenrotation im Tibiofemoralgelenk.^{5–9,30,38,56} Die genaue Bedeutung des HKB als sekundärer Stabilisator der Rotation im Tibiofemoralgelenk ist derzeit jedoch nicht klar definiert und Angaben über ein erhöhtes Maß an Außenrotation in einem HKB-insuffizientem Knie variieren in der Literatur. So zeigten zum Beispiel schon Girgis et al. in ihrer Kadaverstudie von 1975 eine erhöhte Außenrotation des Tibiofemoralgelenkes bei isolierter Durchtrennung des HKB.³⁰ Auch Kennedy et al. und Wijdicks et al. konnten in ihren Kadaverstudien eine signifikant erhöhte Außenrotation nach isolierter Durchtrennung des HKB gegenüber dem intakten Zustand nachweisen.^{6,7}

In einer weiteren Kadaverstudie von Sekiya et al. resultierte das Durchtrennen des HKB in einer signifikant vergrößerten tibiofemorale Außenrotation von durchschnittlich 6,7° bei einem angewendeten Drehmoment von 5 Nm.⁸

Demgegenüber stehen jedoch mehrere Studien, die keine signifikante Erhöhung der tibiofemorale Außenrotation bei alleiniger Durchtrennung des HKB verzeichnen konnten.²³ So konnten zum Beispiel Nielsen et al. in ihrer Kadaverstudie keine erhöhte tibiofemorale Außenrotation nach kompletter Durchtrennung des HKB beobachten.⁵⁷ Kaneda et al. kamen in ihrer Kadaverstudie zu dem gleichen Ergebnis.⁵⁸ Petrigliano et al. konnten in der von ihnen durchgeführten Kadaverstudie zwar eine leicht erhöhte tibiofemorale Außenrotation des HKB durchtrennten Kniegelenkes bei 90° beobachten, dieser Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant.⁵⁹

Bestätigt werden die Ergebnisse der herabgesetzten tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei isolierter HKB-Insuffizienz jedoch wiederum durch Studien, die diese Funktion in einen aktiven muskuloskeletalen Zusammenhang setzen. So stellten Gill et al. in ihrer Kadaverstudie unter simulierten Muskelkräften eine erhöhte Außenrotationsinstabilität bei HKB-insuffizienten Kniegelenken fest.⁶⁰ Kozanek et al. zeigten in ihrer Analyse von 14 Patienten mit isolierter HKB-Insuffizienz eine herabgesetzte tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei der Durchführung von Kniebeugen, die zu einer erhöhten Belastung der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke führte.⁵⁶ Auch in anderen Studien wird die Funktion des HKB für die sekundäre Stabilisation der tibiofemorale Außenrotation vor allem im Zusammenhang mit den Strukturen der posterolateralen Gelenkecke deutlich. So konnten mehrere Kadaverstudien zeigen, dass die zusätzliche Durchtrennung des HKB in Kombination mit Durchtrennung von Strukturen der posterolateralen Gelenkecke zu einer größeren Erhöhung der tibiofemorale Außenrotationsinstabilität führt, als die alleinige Durchtrennung von Strukturen der posterolateralen Gelenkecke.^{61,62} Andere Studien zeigten den gleichen Zusammenhang, indem sie bei einem auf das Tibiofemoralgelenk angewendeten axialen Drehmoment eine höhere Belastung des HKB nach der Durchtrennung von Strukturen der posterolateralen Gelenkecke zeigten.⁶³⁻⁶⁶ Kennedy et al. konnten in ihrer Kadaverstudie außerdem eine erhöhte tibiofemorale Innenrotation in den Knieflexionsgraden von 90°-120° nach Durchtrennung des HKB bei einem axial angewendeten Drehmoment von 5 Nm nachweisen.⁴⁷

Es lässt sich feststellen, dass dem HKB in den letzten Jahren eine größere Bedeutung in der Rotationsstabilität des Tibiofemoralgelenkes zugesprochen wird. Weiterhin konnte

gezeigt werden, dass ein Zusammenwirken des HKB mit der posterolateralen Gelenkecke in der Stabilisierung der Außenrotation des Tibiofemoralgelenkes besteht. Eine Insuffizienz des HKB verändert die Kniegelenkskinematik und führt dadurch zu Langzeitschäden des Gelenkes. Sanders et al. ermittelten, dass eine HKB-Verletzung nach durchschnittlich 12 Jahren mit einem 6,2-fach erhöhten Risiko für das Auftreten einer Kniegelenksarthrose verbunden ist.¹ Skyhar et al. und MacDonald et al. konnten in ihren Kadaverstudien einen erhöhten Kontaktdruck im medialen Kompartiment des HKB-insuffizienten Kniegelenkes nachweisen.^{67,68} Van de Velde et al. konnten diese Ergebnisse in ihrer Analyse von 14 Patienten mit isolierter HKB Verletzung bei der Durchführung einer single leg lunge *in vivo* bestätigen.⁶⁹ Diese Erkenntnisse korrelieren sehr gut mit den klinischen Befunden von chronisch HKB-insuffizienten Patienten. So konnten Strobel et al. in ihrer arthroskopischen Evaluation von 45 Patienten mit einer seit mindestens 5 Jahren bestehender HKB-Insuffizienz in 77,8 % der Fälle eine erhöhte Knorpeldegeneration im medialen Tibiofemoralgelenk feststellen.²

1.3.3 Anatomie der posterolateralen Gelenkecke

Die posterolaterale Gelenkecke ist ein funktioneller Komplex, bestehend aus ligamentären, kapsulären und muskulotendinösen Strukturen. Sie weist einen dreischichtigen Aufbau auf. Zur oberflächlichsten Schicht zählen die Fascia lata, der Tractus iliotibialis und der M. biceps femoris. Die mittlere Schicht besteht aus dem Retinaculum patellae laterale und dem Lig. patellofemorale. Die tiefste Schicht umfasst die folgenden Strukturen: Lig. collaterale laterale (LCL), die Sehne des M. popliteus, Lig. popliteofibulare, Lig. fabellofibulare und das Lig. arcuatum (Abb. 2).^{70,71}

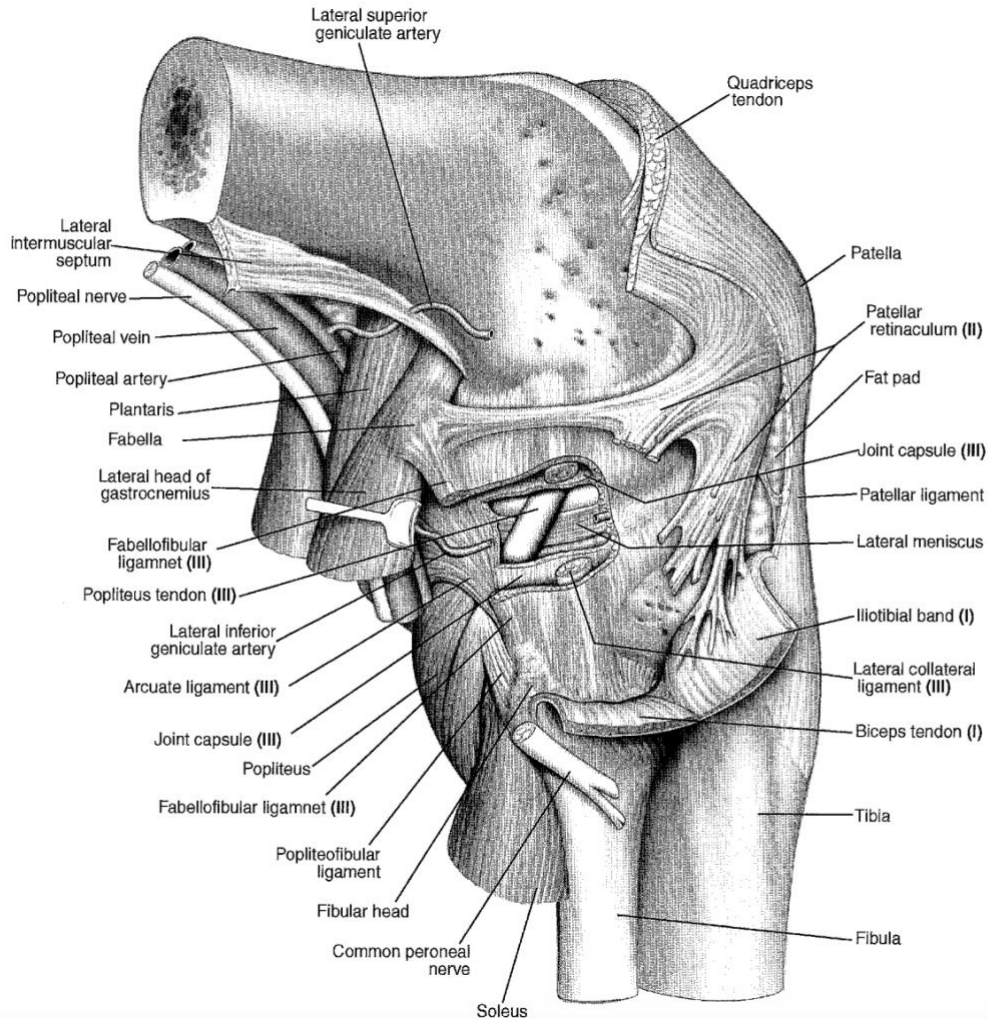


Abbildung 2: Strukturen der posterolateralen Gelenkecke
 - Einteilung in drei Schichten (I) – (III) nach Seebacher et al.⁷⁰

Die drei Hauptstabilisatoren liegen in der tiefsten Schicht. Dazu zählen das LCL, die Sehne des M. popliteus und das Lig. popliteofibulare. Das LCL entspringt 1,4 mm proximal und 3,1 mm posterior des lateralen femoralen Epikondylus und inseriert am Fibulakopf, wo es 38 % der Fläche einnimmt.⁷² Die Sehne des M. popliteus inseriert distal und anterior des lateralen femoralen Epikondylus. Sie verläuft von dort aus intraartikulär durch den Hiatus popliteus, verlässt den Gelenkraum indem es durch das Lig. coronarium durchtritt und verläuft anschließend zum Ursprung des M. popliteus an der posteromedialen Tibia.⁷³ Das Lig. popliteofibulare entspringt am posterioren Anteil des Fibulakopfes und inseriert kranial an der Sehne des M. popliteus. Die Popliteussehne und das Lig. popliteofibulare bilden somit eine Y-förmige, muskulotendinöse Struktur mit Ursprung aus Tibia und Fibula und gemeinsamen Ansatz am lateralen Femur (Abb. 3).⁷⁴

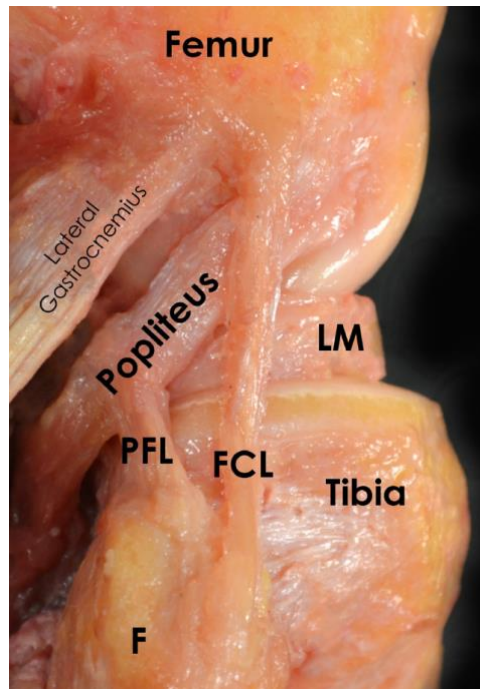


Abbildung 3: Anatomisches Präparat mit den drei in der Tiefe befindlichen wichtigsten statischen Stabilisatoren der posterolateralen Gelenkecke

- Sehne des M. popliteus, Lig. popliteofibulare (PFL) und das Lig. collaterale laterale (LCL; hier = fibular collateral ligament (FCL)); meniscus lateralis (LM); Fibulakopf (F) ⁷²

1.3.4 Biomechanik und Pathobiomechanik der posterolateralen Gelenkecke

Die posterolaterale Gelenkecke ist primärer Stabilisator gegen Varusstreß auf das Tibiofemoralgelenk. Hier spielt in allen Flexionsgraden das LCL die wichtigste Rolle.^{72,73} Zusätzlich ist die posterolaterale Gelenkecke auch primärer Stabilisator für die Außenrotation im Tibiofemoralgelenk. Hierbei hat der Popliteuskomplex, bestehend aus M. popliteus und Lig. popliteofibulare, die wichtigste Funktion. So führte die Durchtrennung dieser Strukturen in Kadaverstudien zu einer deutlich erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität.^{8,62,75} Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die aktive Innenrotation der Tibia in Bezug zum Femur eine der Hauptfunktionen des M. popliteus darstellt.⁷⁶

Die posterolaterale Gelenkecke auch sekundärer posteriorer Stabilisator des Tibiofemoralgelenkes. Die alleinige Durchtrennung dieser Strukturen bewirkt eine geringe Zunahme der dorsalen Verschiebung der Tibia relativ zum Femur. Die gemeinsame Durchtrennung von Strukturen der posterolateralen Gelenkecke und des HKB führt zu einer deutlichen Zunahme der tibiofemorale posterioren Instabilität im Vergleich zur isolierten Durchtrennung des HKB.^{8,77}

Zusätzlich zu dieser statischen Stabilisation zeigten Harner et al. in ihrer Kadaverstudie, dass durch die Aktivierung des M. popliteus die hintere Schublade eines HKB-insuffizienten Kniegelenkes um 36 % reduziert werden konnte. Weiterhin zeigten Vogrin et al. in ihrer Kadaverstudie, dass ohne das Vorhandensein der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke, das HKB deutlich größeren Kräften ausgesetzt ist.⁶⁵ Kang et al. konnten diesen Sachverhalt in ihrer simulierten, biomechanischen Analyse während der Durchführung von Aktivitäten des täglichen Lebens bestätigen.⁶⁶ In der Gesamtschau der biomechanischen Eigenschaften, kann man von einer Synergie des HKB und den Strukturen der posterolateralen Gelenkecke in ihrer Stabilisierungsfunktion des Tibiofemoralgelenkes ausgehen. Hierbei nehmen die Strukturen der posterolateralen Gelenkecke den dominierenden Part in der Stabilisation der Außenrotation und das HKB den dominierenden Part in der posterioren Stabilisation ein.

1.4 Diagnostik

1.4.1 Anamnese

Eine ausführliche Anamnese steht am Beginn der Diagnostik. Ein Verkehrsunfall mit einer dashboard injury oder ein Sportunfall bei gebeugtem Kniegelenk sind Hinweise auf eine Verletzung des HKB.^{11,22} Bei einer isolierten Verletzung des HKB geben Patienten oft moderate Beschwerden an. Sie können das Kniegelenk meistens weiterhin belasten, berichten jedoch über Schmerzen in der Kniekehle und über Probleme bei Kniebeugung.²⁰ Auch ein Instabilitätsgefühl kann ein Hinweis auf eine Beteiligung des HKB sein.²⁶ Bei einer Begleitverletzung der posterolateralen Gelenkecke können zusätzlich Schmerzen im posterolateralen Kniegelenksbereich auftreten. In Kombination mit peripheren Bandverletzungen oder Frakturen der unteren Extremität tritt die Symptomatik einer akuten HKB-Verletzung gewöhnlich in den Hintergrund. Patienten mit einer chronischen HKB-Insuffizienz klagen meistens über Schmerzen im medialen Kompartiment und im Patellofemoralgelenk, da es hier infolge der HKB-Insuffizienz zu einer chronischen Überbelastung kommt.^{2,67,78} Auch in der chronischen Situation können Patienten über ein Instabilitätsgefühl klagen. Die Symptomatik einer chronischen HKB-Insuffizienz entwickelt sich in der Regel erst über Jahre nach dem ursächlichem Kniegelenkstrauma.⁷⁹

1.4.2 Klinische Untersuchung & Funktionstests

Die klinische Untersuchung beginnt mit einer gründlichen Inspektion. Dabei können Prellmarken an der ventralen Tibia oder ein Hämatom in der Kniekehle Hinweise auf eine HKB-Ruptur darstellen.²⁰ Bei ausgeprägten Befunden kann auch eine spontane hintere Schublade inspektorisch erkennbar sein. Diese tritt in Rückenlage bei 90° gebeugtem Kniegelenk auf und wird als posterior sag sign bezeichnet (Abb. 4).⁸⁰

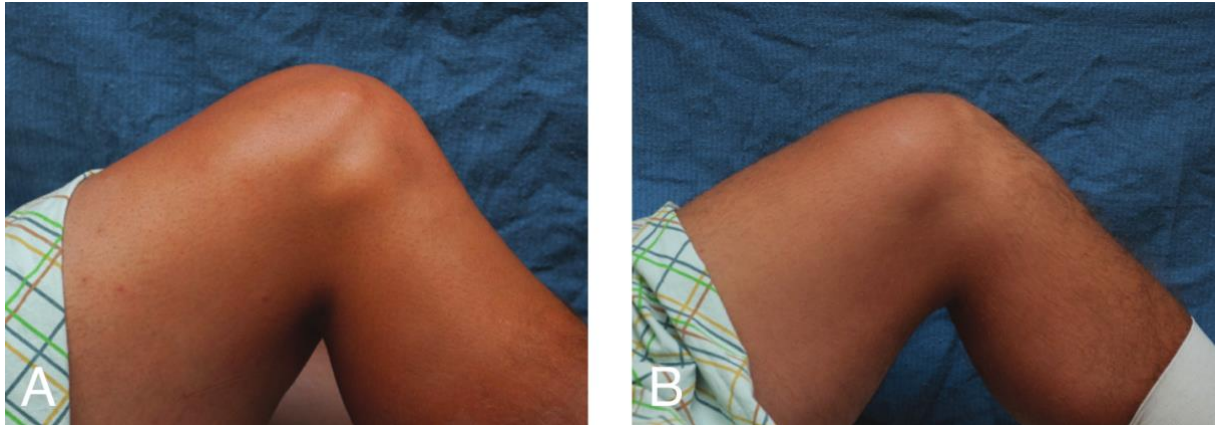


Abbildung 4: Posterior sag sign

A) betroffenes Kniegelenk mit positivem posterior sag sign

B) kontralaterales gesundes Kniegelenk zum Vergleich³⁸

Durch Palpation können Schmerzen in der Kniekehle und bei eventueller Begleitverletzung der posterolateralen Gelenkecke auch posterolateral ausgelöst werden. Ein intraartikulärer Erguss ist aufgrund der retrosynovialen Lage des HKB oft nur milde ausgeprägt oder fehlt gänzlich. Bei akuten Kniegelenksverletzungen, sind auch stets die periphere Durchblutung, Sensibilität und Motorik zu überprüfen. Umfassende Funktionstests sind auf Bandinstabilitäten und Meniskusverletzungen durchzuführen. Für die spezifische Untersuchung des HKB empfehlen sich die folgenden Untersuchungen.

1.4.2.1 Step-off-Test

Der Step-off-Test ist ein einfach und schnell auszuführender Test. In 90° Kniegelenksbeugung palpiert der Untersucher die mediale Femurkondyle und das mediale Tibiaplateau. Normalerweise steht das mediale Tibiaplateau in dieser Position ca. 10 mm ventral der medialen Femurkondyle und kann bei Palpation von kranial nach kaudal als Stufe (Step-off) getastet werden. Ist diese Stufe im Vergleich zur Gegenseite verkleinert oder aufgehoben, so ist der Step-off-Test positiv (Abb. 5).

Der positive Step-off-Test wird in 3 Grade unterteilt. Grad 1 liegt vor, wenn eine verminderte Stufe im Vergleich zur gesunden Gegenseite tastbar ist. Hier geht man von einer hinteren Schublade von ca. 5 mm aus. Grad 2 liegt vor, wenn die mediale Tibiakante auf Höhe der medialen Femurkondyle tastbar ist und der Step-off somit aufgehoben ist. Hier geht man von einer hinteren Schublade von ca. 6-10 mm aus. Grad 3 liegt vor, wenn das mediale Tibiaplateau dorsal der medialen Femurkondyle zu palpieren ist, was einer posterioren Translation von mehr als 10 mm entspricht.⁸¹



Abbildung 5: Step-off-Test

1.4.2.2 Posterior-Drawer-Test

Der Posterior-Drawer-Test ist ein häufig angewendeter Test und wird ebenfalls in 90° Kniebeugung ausgeführt. Hierbei umgreift der Untersucher mit beiden Händen den proximalen Unterschenkel und prüft durch einen nach dorsal gerichtetem Druck das Ausmaß der posterioren Tibiatrianlation (Abb. 6). Wichtig ist es, auf die richtige Ausgangsposition der Tibia zu achten, da eine spontane hintere Schublade das Ausmaß der posterioren Tibiatrianlation deutlich vermindern kann. Durch die Tibiatrianlation in einer spontanen hinteren Schublade kann eine vermehrte AP-Translation auch als vordere Schublade fehlgedeutet werden und dadurch eine HKB-Insuffizienz als VKB-Insuffizienz fehlinterpretiert werden. Auch der Anschlag am Ende der posterioren Tibiatrianlation sollte getestet werden und als weich oder fest gewertet werden. Rubinstein et al. konnten eine Sensitivität von 90 % bei einer Spezifität von 99 % für den Posterior-Drawer-Test in Kombination mit dem Step-off Test zur Erkennung einer HKB-Insuffizienz nachweisen.⁸²



Abbildung 6: Posterior-Drawer-Test

1.4.2.3 Hyperextensionstest

Hierbei wird die Handfläche des Untersuchers so auf die Tuberositas tibiae des 90° gebeugten Kniegelenkes platziert, dass die Finger Kontakt zu Patella haben. Kommt es nun unter einem nach dorsal gerichteten Druck zu einer Hyperextension der Fingergrundgelenke, so zeigt dies eine posteriore Verschiebung der Tibia gegenüber der Patella und der Test ist positiv (Abb. 7).²⁰

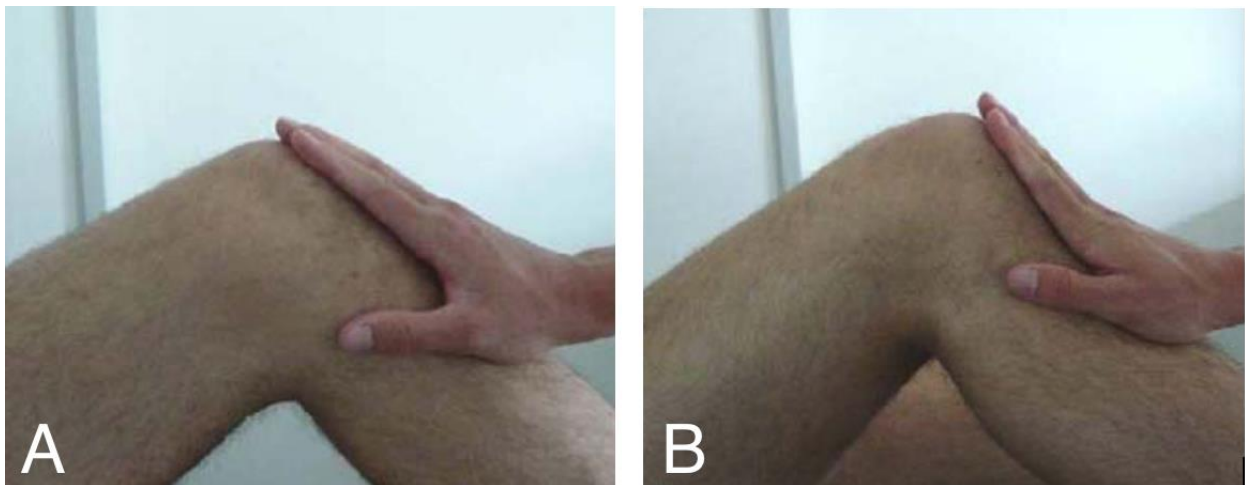


Abbildung 7: Hyperextensionstest
A) Ausgangsposition B) Positiver Test²⁰

1.4.2.4 Godfrey-Test

Beim Godfrey-Test wird der Patient in Rückenlage gelagert und die Hüft- und Kniegelenke 90° flektiert. Die Unterschenkel des Patienten werden dabei auf Höhe der Fersen abgestützt. In dieser Position fällt die proximale Tibia bei einer vorliegenden HKB-Insuffizienz durch die wirkende Schwerkraft in die hintere Schublade. Diese dorsale Tibiatranslation wird im Seitenvergleich beurteilt.⁸¹

1.4.2.5 Dial-Test

Aufgrund der Funktion des HKB als Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation bei vermehrter Kniegelenksflexion und der Tatsache, dass in 37-62 % der Fälle eine Verletzung des HKB in Kombination mit einer Verletzung der posterolateralen Gelenkecke einhergeht, sollte bei jedem Patienten mit Verdacht auf eine HKB-Verletzung die tibiofemorale Rotationsstabilität überprüft werden.^{11-13,16,64} Dies geschieht in der klinischen Untersuchung mit dem Dial-Test, welcher erstmals von Noyes et al. beschrieben wurde.^{20,61,83,84} Der Dial-Test kann in Bauchlage oder Rückenlage durchgeführt werden. Die Bauchlage sollte aufgrund der verminderten posterioren Subluxation der Tibia und da der Patient in dieser Lagerung die Oberschenkelmuskulatur besser entspannen kann, bevorzugt werden.⁸⁵ Der Untersucher greift die Füße des Patienten und bringt die Unterschenkel in maximale Außenrotation. Das Ausmaß der Außenrotation kann nun mit Hilfe eines Goniometers gemessen und im Seitenvergleich beurteilt werden. Diese Untersuchung wird in 30° und 90° Kniebeugung durchgeführt. Eine vermehrte Außenrotation von mehr als 10° wird als positiv gewertet (Abb. 8).^{62,73,86,87} Eine alleinige vermehrte Außenrotation in 30° Knieflexion im Seitenvergleich spricht für eine isolierte Verletzung der posterolateralen Gelenkecke. Eine vermehrte Außenrotation auch bei zunehmender Knieflexion deutet auf eine kombinierte Verletzung des HKB und der posterolateralen Gelenkecke hin.⁶¹

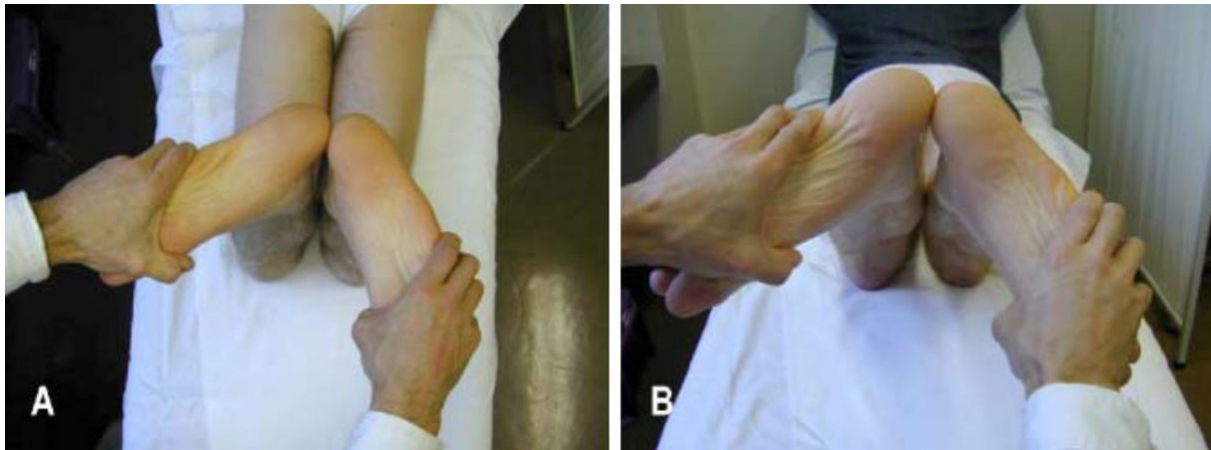


Abbildung 8: Dial-Test²⁰

- A) vermehrte Außenrotation bei 90° Knieflexion,
B) vermehrte Außenrotation bei 30° Knieflexion**

Der Dial-Test wird derzeit bevorzugt angewendet, um eine tibiofemorale Außenrotationsinstabilität in Studien oder in der Klinik zu diagnostizieren.^{24,83,84,87–89} Allerdings weist dieser Test einige Schwächen auf. So konnten Jung et al. in ihrer klinischen Studie zeigen, dass das Ergebnis des Dial-Tests stark von der Position der Tibia in Relation zum Femur abhängig ist. So führt eine nach anterior gerichtete Kraft auf die Tibia während der Durchführung des Dial-Tests, die Tibia aus einer möglichen Position der Subluxation in eine Neutralstellung. Diese Vorgehensweise führte zu größeren Werten in der Rotationsmessung als ohne nach anterior gerichtete Kraft auf die Tibia.⁸⁶ Auch Lee et al. konnten zeigen, dass wenn man den Test bei Patienten mit kombinierter Verletzung des HKB und der posterolateralen Gelenkecke in Rückenlage durchführt, es durch eine manuell auf den Unterschenkel applizierte, nach anterior gerichtete Kraft, zu einem vermehrten Seitenunterschied in der Außenrotation von ca. 6° sowohl in 30°, als auch in 90° Kniebeugung kommt.⁹⁰

Darüber hinaus misst man beim Dial-Test die tibiofemorale Rotationsstabilität nur in einer indirekten Weise. Während der Ausführung prüft man diese über einen Griff an den Füßen des Probanden. Dabei wird in der Durchführung des Dial-Tests nicht nur isoliert das Tibiofemoralgelenk bewegt, sondern auch das obere und untere Sprunggelenk mitbewegt.

1.4.3 Apparative Verfahren

Apparative Verfahren gehören derzeit nicht zum klinischen Standard in der Diagnostik der HKB-Ruptur. Allerdings wurden Arthrometer zur objektiven, nichtinvasiven Messung der AP-Stabilität des Tibiofemoralgelenkes entwickelt. Diese werden vorwiegend in Studien oder in klinischen Situationen, wo eine schnelle nichtinvasive Methode zur Objektivierung der AP-Stabilität benötigt wird, eingesetzt.

Am weitesten verbreitet sind der KT-1000, der Nachfolger KT-2000 und der Rolimeter.^{91,92} Von Strobel et al. wird zur Anwendung bei HKB-Insuffizienz auch der Knie-Laxizitäts-Tester empfohlen.²⁷ Zur Analyse der tibiofemorale AP-Stabilität wird eine definierte nach anterior gerichtete Kraft auf die Tibia angewendet und dann die tibiofemorale Verschiebung in Millimeter abgelesen. Zur Diagnose der posterioren AP-Stabilität kann diese Kraft auch nach posterior appliziert werden. Gemein ist allen Arthrometern jedoch, dass sie in der Diagnostik der HKB-Insuffizienz ein Problem mit der Definition des Neutralpunktes haben. So befindet sich die Tibia schon vor der Applikation aufgrund des Eigengewichtes der Tibia in der dorsalen Schublade. Dieser Effekt wird durch das Gewicht des jeweiligen Arthrometers noch verstärkt. Daniel et al. entwickelten den „Quadriceps neutral angle“, um eine einheitliche Ausgangsposition zu schaffen.⁹³ Diese einheitliche Ausgangsposition ist jedoch nur schwer anzuwenden und Huber et al. konnten zeigen, dass eine posteriore Anwendung eines Arthrometers selbst bei Anwendung des „Quadriceps neutral angle“ zu unbefriedigenden Ergebnissen führt.⁹⁴ In der Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität findet derzeit kein apparatives Verfahren im klinischen Alltag Anwendung. Lediglich in Studien wurden zahlreiche Verfahren zur Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität entwickelt und angewendet. So verwendeten Almquist et al. in ihrer Studie ein goniometerbasiertes Verfahren.⁹⁵ Musahl et al. entwickelten ein System mit einem elektromagnetischen Sensor um die Rotationsstabilität im Tibiofemoralgelenk zu erfassen.⁹⁶ Auch Hoshino et al. benutzten ein elektromagnetisches Verfahren in ihrer Studie.⁹⁷ Park et al. analysierten die tibiofemorale Rotationsstabilität mit Hilfe von Leuchtdioden (LED).⁹⁸ Lorbach et al. benutzten elektronische Sensoren zur Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität.⁹⁹ Alle diese Verfahren stellen indirekte Verfahren dar, ohne direkte Darstellung der Gelenkpartner. Dies führt dazu, dass Weichteilartefakte die Ergebnisse verzerren und im Allgemeinen die tibiofemorale Rotation sich als größer darstellt, als sie eigentlich ist.¹⁰⁰ Kothari et al. untersuchten mit Hilfe eines direkten, MRT-basierten Verfahrens VKB-rekonstruierte Kniegelenke im Vergleich zur gesunden Gegenseite auf ihre tibiofemorale

Rotationsstabilität. In ihrem Versuchsaufbau ist jedoch lediglich die statische Messung bei 15° Kniebeugung möglich.¹⁰¹ Das „Porto-knee-testing device“, welches von Espregueira-Mendes et al. entwickelt wurde, ist ein ähnliches MRT-basiertes Verfahren welches ebenfalls nur die Messung in Winkelgraden bis 30° Knieflexion unter statischen Bedingungen erlaubt.¹⁰² Bleday et al. entwickelten ein handliches Gerät zur Objektivierung der tibiofemorale Rotation.¹⁰³ Allerdings erfasst dieses Gerät nur die Rotation und nicht das angewendete Drehmoment. Insofern stellt es nicht die tibiofemorale Rotationsstabilität, sondern nur das Bewegungsausmaß der tibiofemorale Rotation dar. In jüngster Zeit werden auch immer öfter Navigationssysteme zur Bestimmung der tibiofemorale Rotation genutzt. Dies findet derzeit jedoch aufgrund der nötigen Anwendung von fixen Knochenmarkern fast ausschließlich intraoperativ und ohne präzise Bestimmung der tibiofemorale Rotationsstabilität statt.¹⁰⁴

1.4.4 Bildgebende Verfahren

Bei akutem Verdacht auf eine HKB-Verletzung sind zum allgemeinem Frakturausschluss und zum Ausschluss von knöchernen Bandausrissen Röntgenaufnahmen in 2 Ebenen obligat.²⁰ Bei chronischen Läsionen sollten beidseitige Belastungsaufnahmen nach Rosenberg durchgeführt werden. Durch sie kann man Sekundärschäden wie z.B. eine mediale Gonarthrose erkennen. Darüber hinaus stellen sich chronische HKB-Läsionen in Röntgenaufnahmen oft durch Verknöcherungen oder Verkalkungen im Verlauf des HKB dar.²⁰

Des Weiteren sollte bei Verdacht auf eine HKB-Insuffizienz stets eine Magnetresonanztomographie (MRT) durchgeführt werden.¹⁰⁵ Im MRT können die Kniebinnenstrukturen dargestellt und dadurch Kniebinnenschäden diagnostiziert werden. So ist das MRT im Rahmen der Akutphase bei eingeschränkter Beurteilbarkeit der klinischen Untersuchung ein wertvolles Diagnostikum. Zusätzlich kann dadurch eine HKB-Verletzung in Partialruptur, Komplettruptur mit Dehiszenz und Komplettruptur ohne Dehiszenz eingeteilt werden.²⁷ Bei chronischen HKB-Läsionen können durch das MRT Folgeschäden wie zum Beispiel Knorpelschäden im medialen Kompartiment oder etwaige Meniskusschäden dargestellt werden. Es gilt immer zu bedenken, dass anhand der MRT-Bildgebung keine Aussage über die Funktionsfähigkeit des HKB gemacht werden kann. In der Diagnostik der HKB-Insuffizienz sind die gehaltene Röntgenaufnahmen der Goldstandard um die AP-Stabilität des Tibiofemoralgelenkes zu quantifizieren und damit die Funktionsfähigkeit des HKB zu beurteilen.^{106,107}

Sie sind den nichtinvasiven Verfahren wie zum Beispiel dem Arthrometer klar überlegen.¹⁰⁸ Bezüglich der Durchführung der gehaltenen Röntgenaufnahmen gibt es mehrere Varianten. Jung et al. konnten im Vergleich fünf verschiedener Systeme zeigen, dass das Telos System sehr geeignet ist und eine präzise, wenig schmerzhaft und schnell durchzuführende Methode darstellt.¹⁵ Hierbei wird der Unterschenkel der Patienten innerhalb eines Haltegerätes fixiert und es wird eine jeweils nach anterior und posterior gerichtete Kraft von 150 N mit Hilfe eines gepolsterten Kraftapplikators auf die proximale Tibia ausgeübt. Während der Kraftapplikation wird eine Röntgenaufnahme zur Bestimmung der vorderen Schublade (VSL) und hinteren Schublade (HSL) angefertigt. Gwinner et al. konnten zeigen, dass die HSL mit dem individuellen Ausmaß des tibialen Slopes korreliert.¹⁰⁹ Aufgrund dieser Tatsache und der individuell variierenden Gelenkstabilität, sollte die hintere Schublade ausschließlich im Seitenvergleich beurteilt werden. Auch auf das Vorliegen einer fixierten hinteren Schublade sollte geachtet werden, da in diesem Zustand eine HKB-Rekonstruktion kontraindiziert ist.¹¹⁰ Sie ist dadurch definiert, dass bei einer nach anterior gerichteten Stressapplikation die Tibia nicht in Neutralstellung in Relation zum Femur zu bringen ist. Weiterhin ist zu beachten, dass die gehaltenen Röntgenaufnahmen in der ersten Woche nach Verletzung mit einer reduzierten Kraft von 50 N durchzuführen sind. In den darauffolgenden 6 - 8 Wochen nach Verletzung sollte auf die Aufnahmen gänzlich verzichtet werden, um heilende Fasern nicht zu schädigen oder zu elongieren.²⁰

Begleitverletzungen der posterolateralen Gelenkecke lassen sich im konventionellen Röntgen in der Regel nicht darstellen.⁸⁷ Eine Seitendifferenz von mehr als 10 mm in der Stressradiographie ist jedoch ein Hinweis auf eine Beteiligung der posterolateralen Gelenkecke.⁹ Auch das MRT kann strukturelle Schäden an Strukturen der posterolateralen Gelenkecke darstellen.¹¹¹ Ein standardisiertes, bildgebendes Verfahren zur Beurteilung des Funktionszustandes der posterolateralen Gelenkecke oder der tibiofemorale Rotationsstabilität existiert aktuell nicht.

1.4.5 Arthroskopie

Die arthroskopische Beurteilung einer HKB-Läsion stellt sich als schwierig dar, da es von ventral nur schwer und inkomplett einzusehen ist. Man benötigt zur arthroskopischen Evaluation des HKB daher ein zusätzliches posteromediales Portal.²⁶ Von ventral können lokale Einblutungen und kleine Einrisse im Fettkörper im Bereich des femoralen Ursprungs auf eine HKB-Läsion hinweisen. Ein weiteres Zeichen einer HKB-Läsion ist

das sogenannte floppy ACL sign (Abb. 9A) Hierbei stellt sich das VKB aufgrund der posterioren Subluxation der Tibia als aufgelockerte, siphonartige Struktur dar. Bei einem nach anterior gerichteten Druck auf die Tibia erscheint es wieder in seiner normalen, gespannten Konfiguration. Hierbei ist es wichtig das floppy ACL sign nicht als VKB-Läsion fehlzuinterpretieren.²⁰ Bei chronischen HKB-Läsionen lassen sich aufgrund der Pathobiomechanik der HKB-Insuffizienz oft Knorpelschäden im medialen Kompartiment arthroskopisch diagnostizieren.²

Bei arthroskopischen Hinweisen auf eine Läsion des HKB sollten ebenso die Strukturen der posterolateralen Gelenkecke untersucht werden. Jedoch konnten Kim et al. zeigen, dass die arthroskopische Evaluation der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke eine niedrige Sensitivität in Bezug auf die Diagnosestellung einer posterolateralen Instabilität (PLRI) aufzeigt.¹¹² Auch Fineberg et al. konnten zeigen, dass die arthroskopische Evaluation des Popliteuskomplexes nur sehr eingeschränkt möglich ist.¹¹³ Wird das Kniegelenk während der Arthroskopie jedoch in der Vierer-position gelagert, kann man die Funktionalität der posterolateralen Gelenkecke beurteilen. Stellt sich in dieser Position der gesamte Außenmeniskus dar und kommt es zu einer deutlich vermehrten lateralen Aufklappbarkeit, kann man von einer PLRI ausgehen (Abb. 9B).

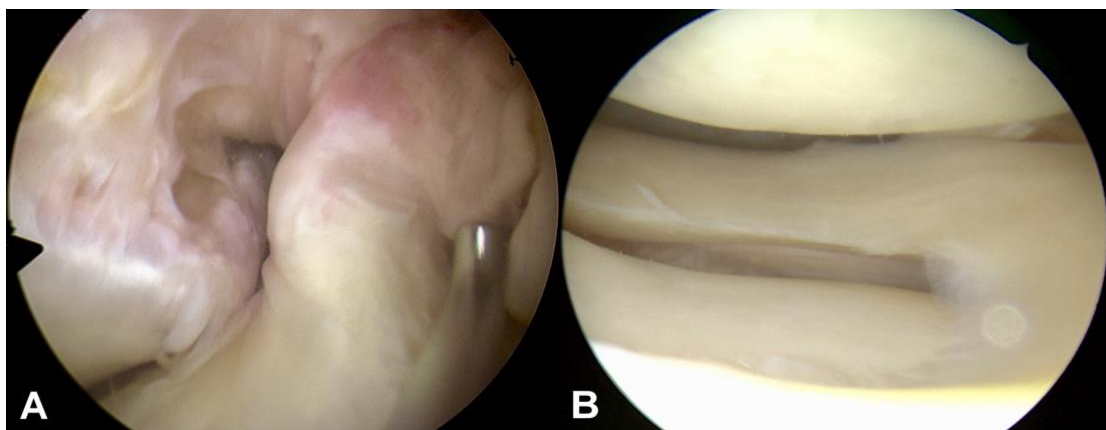


Abbildung 9: Arthroskopische Evaluation HKB Insuffizienz und posterolaterale Instabilität
A) floppy ACL sign, B) Darstellung des Außenmeniskus mit vermehrter lateraler Aufklappbarkeit

Strobel et al. und Scheffler et al. teilten die beschriebene laterale Aufklappbarkeit in 3 Grade ein:^{27,73}

1° = ≤ 5 mm Gelenkspaltöffnung

2° = 6 - 10 mm Gelenkspaltöffnung

3° = > 10 mm Gelenkspaltöffnung

Jedoch lässt sich diese Einteilung nur als Richtwert verstehen, da es sich immer um eine subjektive Einschätzung handelt, da weder die applizierte Kraft noch das Maß der Aufklappbarkeit quantitativ erfasst wird.

1.5 Klassifikation

Es bestehen eine Vielzahl an Klassifikationen für die Verletzung des HKB. So sollte immer in akut, subakut oder chronisch unterteilt werden. Dabei liegt laut Strobel et al. eine akute Läsion vor, wenn der Unfall weniger als 3 Wochen zurückliegt. Ein subakuter Zustand liegt im Zeitraum von 3 Wochen bis 3 Monate nach dem Unfall vor. Eine chronische Läsion ist definiert als eine HKB-Läsion, bei der der Unfall mehr als 3 Monate zurückliegt. Zusätzlich kann man eine HKB-Verletzung, bei der der Unfall mehr als 5 Jahre zurückliegt als chronische Langzeit-Läsion beschreiben.^{11,27}

Eine weit verbreitete Einteilung für die Schwere der HKB-Insuffizienz ist die Klassifikation nach Harner et al. (Tab. 1):

Tabelle 1: Klassifikation der HKB-Insuffizienz nach Harner ^{5,26}

	A	B	C	D
HINTERE SCHUBLADE (HSL)	< 5 mm	5 – 10 mm	10 – 15 mm	> 15 mm
HSL IN AUSSENROTATION	abnehmend	gleichbleibend	gleichbleibend	zunehmend
VARUSINSTABILITÄT	-	-	-/+	+
DIAGNOSE	isoliert	isoliert	kombiniert	kombiniert
THERAPIE	Physiotherapie	OP wenn symptomatisch	OP	OP

1.6 Therapie

1.6.1 Konservative Therapie

Aufgrund der hohen Heilungspotenz und der guten Vaskularisierung können akute, isolierte HKB-Verletzungen mit einer dorsalen Schublade von im Seitenvergleich weniger als 10 mm der konservativen Therapie zugeführt werden.^{18,114–117}

Derzeit besteht kein klar definierter internationaler Standard in der konservativen Therapie von HKB-Verletzungen. Daher existieren in der Literatur mehrere unterschiedliche Behandlungsprotokolle.¹¹⁸ Das von uns angewendete Behandlungsschema besteht aus einer 12-wöchigen Schienenbehandlung. In den ersten 6 Wochen trägt der Patient eine PTS-Orthese (medi GmbH & Co. KG, Bayreuth) 24 Stunden täglich. Die PTS-Orthese darf in den ersten 6 Wochen nur zur physiotherapeutischen Behandlung entfernt werden. Während der physiotherapeutischen Behandlung erfolgen passive Bewegungsübungen ausschließlich in Bauchlage, nach dem folgenden Schema: 1. - 2. Woche passive Knieflexion bis 20°; 3. - 4. Woche passive Knieflexion bis 40°; 5. - 6. Woche passive Knieflexion bis 60°. Die Belastung sollte in den ersten zwei Wochen nicht mehr als 10 kg, in der 3. - 4. Woche nicht mehr als 20 kg und bis zur 6. Woche nicht mehr als das halbe Körpergewicht betragen.

Von der 6. Woche bis zur 12. Woche erfolgt die Behandlung in einer funktionellen HKB-Orthese. In dieser Zeit wird zur Vollbelastung übergegangen. Während der Nacht kann die PTS-Orthese bei ausgedehnten Befunden weiterhin angelegt werden.²⁰

Auch eine chronische isolierte HKB-Insuffizienz mit einer dorsalen Schublade kleiner als 10 mm im Seitenvergleich sollte primär konservativ behandelt werden. Hierbei steht die funktionelle Behandlung im Vordergrund. Um die vorhandene Instabilität aktiv auszugleichen, sollte dabei ein Hauptaugenmerk auf die physiotherapeutische Kräftigung des M. quadriceps femoris gelegt werden. Ist eine derartige HKB-Insuffizienz trotz adäquater Physiotherapie symptomatisch, so kann man einen Orthesentest durchführen. Hierbei trägt der Patient 6 Wochen lang eine funktionelle HKB-Orthese. Kommt es darunter zu einer Besserung der Symptomatik, kann die Indikation zur Operation gestellt werden.^{26,114}

1.6.2 Operative Therapie

Eine akute Ruptur des HKB kombiniert mit einer PLRI sollte operativ versorgt werden. Sie besteht bei einer HSL von im Seitenvergleich mehr als 12 mm, kombiniert mit einer vermehrten Varusaufklappbarkeit und/oder einer vergrößerten tibiofemorale Außenrotation in 30° und/oder 90°. ^{20,38,119} Auch sehr ausgeprägte oder symptomatische chronische HKB-Insuffizienzen, sowie chronische HKB-Insuffizienzen mit PLRI sollten der operativen Therapie zugeführt werden.²⁰ Ein klarer Konsens wann eine operative Therapie der konservativen Therapie überlegen ist, existiert derzeit jedoch nicht. In den letzten Jahren hat sich jedoch ein Trend zur operativen Rekonstruktion des HKB abgezeichnet.^{119,120} Eine fixierte hintere Schublade sollte präoperativ jedoch immer ausgeschlossen werden. Wird eine fixierte Schublade diagnostiziert, so sollte vor der HKB-Rekonstruktion entweder eine 6-wöchige Orthesenbehandlung mit einer PTS-Orthese oder eine arthroskopische Arthrolyse stattfinden.¹¹⁰

Für die operative Rekonstruktion des HKB sind mehrere Techniken beschrieben. So kann man primär in Einzelbündeltechnik und Doppelbündeltechnik unterscheiden. In der Einzelbündeltechnik wird das AL-Bündel rekonstruiert. In der Doppelbündeltechnik wird sowohl das AL-Bündel als auch das PM-Bündel rekonstruiert.

Derzeit wird ein reger Diskurs darüber geführt, welche Technik die zu bevorzugende Technik darstellt. Die Doppelbündeltechnik soll die Anatomie des HKB präzise rekonstruieren und dadurch auch die Funktion möglichst genau wiederherstellen. Dazu werden stets zwei femorale Bohrkanäle und ein oder zwei tibiale Bohrkanäle angefertigt.

Die Doppelbündeltechnik ist das operativ aufwendigere Verfahren mit einer längeren OP-Zeit und einer größeren Anzahl an intraoperativen Fallstricken. Weiterhin stellen sich Revisionsoperationen aufgrund der ausgedehnten Primäroperation als schwieriger dar. In einigen *in vitro* Studien zeigt die Doppelbündeltechnik biomechanische Vorteile gegenüber der Einzelbündeltechnik.^{6,47,48,121,122} Die Studienlage zu den biomechanischen Vorteilen ist jedoch nicht homogen. So kamen andere *in vitro* Studien zu keinem signifikantem Vorteil in der biomechanischen Analyse der beiden Techniken.^{23,123–125}

Die Einzelbündeltechnik rekonstruiert die Funktion des HKB in einem weniger invasivem Verfahren, da hier nur ein femoraler und ein tibialer Bohrkanal angefertigt werden. Mehrere Studien konnten die guten klinischen Ergebnisse dieser Technik darlegen.^{123,126}

Auch im Langzeitverlauf zeigten sich gute Ergebnisse der Einzelbündeltechnik. Hermans et al. untersuchten den postoperativen Verlauf bei 22 Patienten nach durchschnittlich 9 Jahren und präsentierten zufriedenstellende Resultate in Bezug auf die klinische Evaluation nach dem IKDC-Schema und in der subjektiven Kniegelenkgesundheit, welche mit dem Lysholm Score und der visuellen Analogskala evaluiert wurde.¹²⁷ Jedoch zeigte die von Hermans et al. untersuchte Patientenkohorte postoperativ eine verbleibende SSD von 4,7 mm in der hinteren Schublade in der Telos Stressradiographie.

Jackson et al. kamen in ihrem 10 Jahres Follow-up von 26 Patienten zu ähnlich guten Ergebnissen in der Analyse des subjektiven IKDC Score und des Lysholm Scores.¹²⁸ Darüber hinaus konnte in vergleichenden klinischen Studien keine klare subjektive oder objektive Überlegenheit der invasiveren Doppelbündeltechnik gegenüber der weniger invasiven Einzelbündeltechnik gezeigt werden.¹²⁹ Fanelli et al. konnten in ihrem retrospektiven Vergleich von 90 Patienten keinen Unterschied in der Telos-Stressradiographie, sowie in klinischen und subjektiven Scores feststellen.¹³⁰ Yoon et al. konnten in ihrem prospektiven Vergleich zeigen, dass es bei der Doppelbündeltechnik zwar zu einer besseren Rekonstruktion der dorsalen Stabilität um durchschnittlich 1,4 mm kam, die subjektiven und klinischen Scores wiesen jedoch keinen signifikanten Unterschied auf.¹²⁶

In einer weiteren Studie konnten Yoon et al. in einem prospektiven Vergleich mindestens 10 Jahre postoperativ keine signifikanten Unterschiede im klinischen Outcome, der tibiofemorale dorsalen Stabilität sowie dem Arthroseprozess zwischen der Einzelbündeltechnik und der Doppelbündeltechnik feststellen.¹³¹

Die femorale Transplantatfixierung kann mit einer biodegradierbaren Interferenzschraube oder einem femoralen Fixationsbutton in outside-in oder inside-out Technik durchgeführt werden.

In der tibialen Transplantatfixierung unterscheidet man zwischen der tibialen Tunneltechnik und der tibialen Inlay-Technik.¹³² In der tibialen Tunneltechnik wird ein Bohrkanal von ventral in Richtung der dorsalen, tibialen Insertion des HKB angefertigt, durch welches anschließend das Transplantat eingezogen wird.¹³³ Die tibiale Fixation kann daraufhin mit einer bioresorbierbaren Interferenzschraube und einer Postfixation über eine tibiale Knochenbrücke erfolgen.²⁰ In der tibialen Inlay-Technik wird das Transplantat direkt mit einer Schraube an der dorsalen Tibia fixiert.¹³⁴ Die tibiale Tunneltechnik wird arthroskopisch assistiert durchgeführt. Für die tibiale Inlay-Technik wird klassischerweise eine dorsale Eröffnung des Gelenkes benötigt.¹³⁵ Es sind auch komplett arthroskopische Verfahren der tibialen Inlay-Technik beschrieben.¹³⁶ In der von Lee et al. erstellten Metaanalyse konnte kein Vorteil einer Technik gegenüber der anderen beschrieben werden. Jedoch zeigte die Analyse eine Tendenz zu mehr perioperativen Komplikationen bei der tibialen Inlay-Technik im Vergleich zur transtibialen Technik.¹³⁷

Als Transplantatmaterial stehen allogene und autologe Transplantate zur Verfügung. Dabei werden derzeit die Quadricepssehne, die Patellasehne, die Hamstringsehnen oder die Sehne des M. peroneus longus als autologes Transplantatmaterial verwendet.¹³⁸ Als allogenes Transplantatmaterial finden zusätzlich die Achillessehne und die Sehne des M. tibialis posterior Verwendung.¹³²

Bei einer Kombinationsverletzung einer HKB-Ruptur mit Strukturen der posterolateralen Gelenkecke, sollte diese immer ebenfalls rekonstruiert werden. Empfohlen wird hier, wenn möglich ein einzeitiges Vorgehen.²⁶ Auch zur Rekonstruktion der posterolateralen Gelenkecke sind eine Vielzahl an operativen Verfahren beschrieben.¹³⁹ So kann bei einer akuten Verletzung die Naht oder Refixation der Popliteusehne oder anderen Strukturen der posterolateralen Gelenkecke ausreichend sein.^{73,140} Eine weitere Operationstechnik stellen die Versetzungsoperationen, wie z.B. die Bicepstenodese dar.^{141,142} Weit verbreite Anwendung finden aber auch hier rekonstruktive Verfahren mit einem freien Sehnenstransplantat. Dabei kann man prinzipiell anatomische Verfahren, wie die anatomische Rekonstruktion nach Laprade und isometrische Verfahren, wie die modifizierte Larson-Technik oder die Rekonstruktion nach Arciero unterscheiden.^{84,143-147} Auch komplett arthroskopisch Verfahren zur Rekonstruktion der posterolateralen Gelenkecke sind beschrieben.¹⁴⁸

Bei einer kombinierten Rekonstruktion von HKB und der posterolateralen Gelenkecke sollte ein besonderes Augenmerk auf die Beinachse in der Frontal- und Sagittalebene

gelegt werden. Bei einer ausgeprägten knöchernen Varusstellung kann primär eine Korrekturosteotomie indiziert sein. Sie kann mit einer Erhöhung des tibialen Slopes kombiniert werden und dient dazu, die hintere Schublade unter Belastung zu verringern und die Traglinie des Beins leicht ins laterale Kompartiment zu verschieben.¹⁴⁹

1.7 Ziele und Motivation der Arbeit

Das wissenschaftliche Interesse an der tibiofemorale Rotationsstabilität im Zusammenhang mit einer Verletzung des HKB hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen.³ Das hintere Kreuzband wird heute als sekundärer Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation definiert.^{5,38} In diesem Zusammenhang sind zahlreiche biomechanische Kadaverstudien über die Rotationsstabilität von HKB-insuffizienten Kniegelenken vorhanden. Die Ergebnisse dieser *in vitro* Studien sind jedoch inhomogen und können nicht die gesamte Komplexität der klinischen Bewertung von Patienten mit Indikation zur kombinierten oder isolierten HKB-Rekonstruktion wiedergeben.^{6–8,23,30,57–59} Weiterhin findet die Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität in der Klinik derzeit nur durch untersucherabhängige, unpräzise, manuelle Untersuchungen wie den Dial-Test statt, welche die Rotationsstabilität der Gelenkpartner des Tibiofemoralgelenkes nur indirekt wiedergeben.^{20,61,62,90} Bisher entwickelte apparative Verfahren zur Quantifizierung der tibiofemorale Rotationsstabilität sind ebenfalls indirekte Verfahren, die durch Weichteilartefakte verzerrt werden.^{95–100} Demzufolge existieren aktuell nur unzureichende Erkenntnisse über die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten mit HKB-Ruptur und nach isolierter oder kombinierter HKB-Rekonstruktion. In dieser Studie soll durch ein am Julius Wolff Institut entwickeltes und evaluiertes Verfahren die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten mit HKB-Ruptur und anschließender isolierter oder kombinierter Rekonstruktion durch direkte Darstellung der Gelenkpartner erstmalig *in vivo* dargestellt und analysiert werden.^{100,150,151} Es soll hierbei auf prospektive Weise untersucht werden, ob Patienten mit isolierter oder kombinierter HKB-Rekonstruktion präoperativ eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zu dem unverletzten, kontralateralen Kniegelenk aufweisen. Weiterhin soll die tibiofemorale Rotationsstabilität des verletzten Kniegelenkes im postoperativen Verlauf analysiert werden und mit der tibiofemorale Rotationsstabilität des gesunden Kniegelenkes verglichen werden.

Zusätzlich werden die tibiofemorale AP-Stabilität mittels gehaltener Röntgenaufnahmen und eine subjektive Analyse durch Fragebögen als klassische Parameter zur Einordnung und zur Outcome-Analyse der Patientenkohorte erhoben.

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

1. Patienten mit Indikation zur isolierten oder kombinierten Rekonstruktion des HKB zeigen präoperativ eine signifikant erhöhte passive tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zum gesunden kontralateralen Kniegelenk.
2. Patienten zeigen nach erfolgter isolierter oder kombinierter Rekonstruktion des HKB 6 Monate postoperativ keinen signifikanten Unterschied in der passiven tibiofemorale Außenrotationsstabilität im Vergleich zum gesunden kontralateralen Kniegelenk.
3. Patienten zeigen nach erfolgter isolierter oder kombinierter Rekonstruktion des HKB 12 Monate postoperativ keinen signifikanten Unterschied in der passiven tibiofemorale Außenrotationsstabilität im Vergleich zum gesunden kontralateralen Kniegelenk.

2 Material und Methoden

2.1 Patientenkollektiv

Im Zeitraum von November 2015 bis März 2018 wurden durch das Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité 15 Patienten mit geplanter Rekonstruktion des HKB, welche die Ein- und Ausschlusskriterien erfüllten, für die Studie akquiriert. Die Ein- und Ausschlusskriterien sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Tabelle 2: Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none">• Prospektiv erfasste isolierte oder kombinierte HKB-Verletzung mit geplanter operativer Stabilisierung• Rekonstruktion des HKB in tibialer Tunneltechnik und AL-Einzelbündeltechnik• Semitendinosus/Gracilissehnen-transplantat• Gesundes kontralaterales Kniegelenk• Schriftliche Einverständniserklärung des Patienten• Alter \geq 18. Lebensjahr	<ul style="list-style-type: none">• Voroperiertes kontralaterales Kniegelenk• Revisionsrekonstruktion des HKB• Bandinstabilität des kontralateralen Kniegelenkes• Flexion/Extensions-Einschränkungen des kontralateralen Kniegelenkes• Knöcherner Ausriss des HKB• Kniegelenkluxation \geq Typ 4 nach Schenck• Akute Kniegelenksluxation• Fortgeschrittene Arthrose eines Kniegelenkes• BMI > 35• Nervenläsion• Schwangerschaft• Maligne Erkrankung• Arthritis eines Kniegelenkes• Bekannte Durchblutungsstörung der unteren Extremität

Zwei Patienten entschieden sich im Verlauf der Studie noch vor der vollständigen präoperativen Untersuchung gegen die Rekonstruktion des HKB und für eine konservative Therapie. Somit konnten 13 Patienten präoperativ analysiert werden. Im 1. geplanten Follow up (F/U) 6 Monate postoperativ (Spannweite 4 - 6 Monate; Ø 5 Monate) standen alle 13 Patienten für die Analyse zur Verfügung. Im 2. geplanten F/U 12 Monate postoperativ (Spannweite 10 - 14 Monate; Ø 12 Monate) standen 11 Patienten für die Untersuchung zur Verfügung (lost to follow up) (Abb. 10). Zusätzlich zur Untersuchung der Gesamtkohorte wurde in der Analyse der tibiofemorale Rotationsstabilität eine Subgruppenunterteilung in zwei Subgruppen vorgenommen.

Die eine Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS erhalten haben. Die andere Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB ohne PLS erhalten haben. Die Subgruppenunterteilung erfolgte aufgrund der Tatsache, dass bei den Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion in Kombination mit einer PLS erhalten haben, in der klinischen und intraoperativen Untersuchung die Diagnose einer PLRI gestellt wurde. Bei diesen Patienten wurde somit klinisch und intraoperativ eine behandlungsbedürftige, erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität diagnostiziert. Alle 13 Patienten erhielten die Rekonstruktion des HKB in gleicher Operationstechnik. Weiterhin wurden alle Patienten vom gleichen Operateur am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité untersucht und operativ versorgt. Die Studie folgt den Konventionen der Deklaration von Helsinki und ein bewilligter Ethikantrag der Ethik-Kommission der Charité lag bei Studienbeginn vor (EA2/141/14). Alle Patienten wurden vor Beginn der Studie umfassend schriftlich und mündlich über die Studie und die Freiwilligkeit ihrer Teilnahme aufgeklärt und unterzeichneten eine Einverständniserklärung. Die Durchführung der Messungen und die Betreuung der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit der medizinischen Doktorandin Annika Lippert. Die Studie wurde in Kooperation mit dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité, dem Julius Wolff Institut und dem Zuse Institut Berlin durchgeführt. Es bestand eine Förderung der Studie durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und durch den Verein Deutsche Arthrose Hilfe e.V..

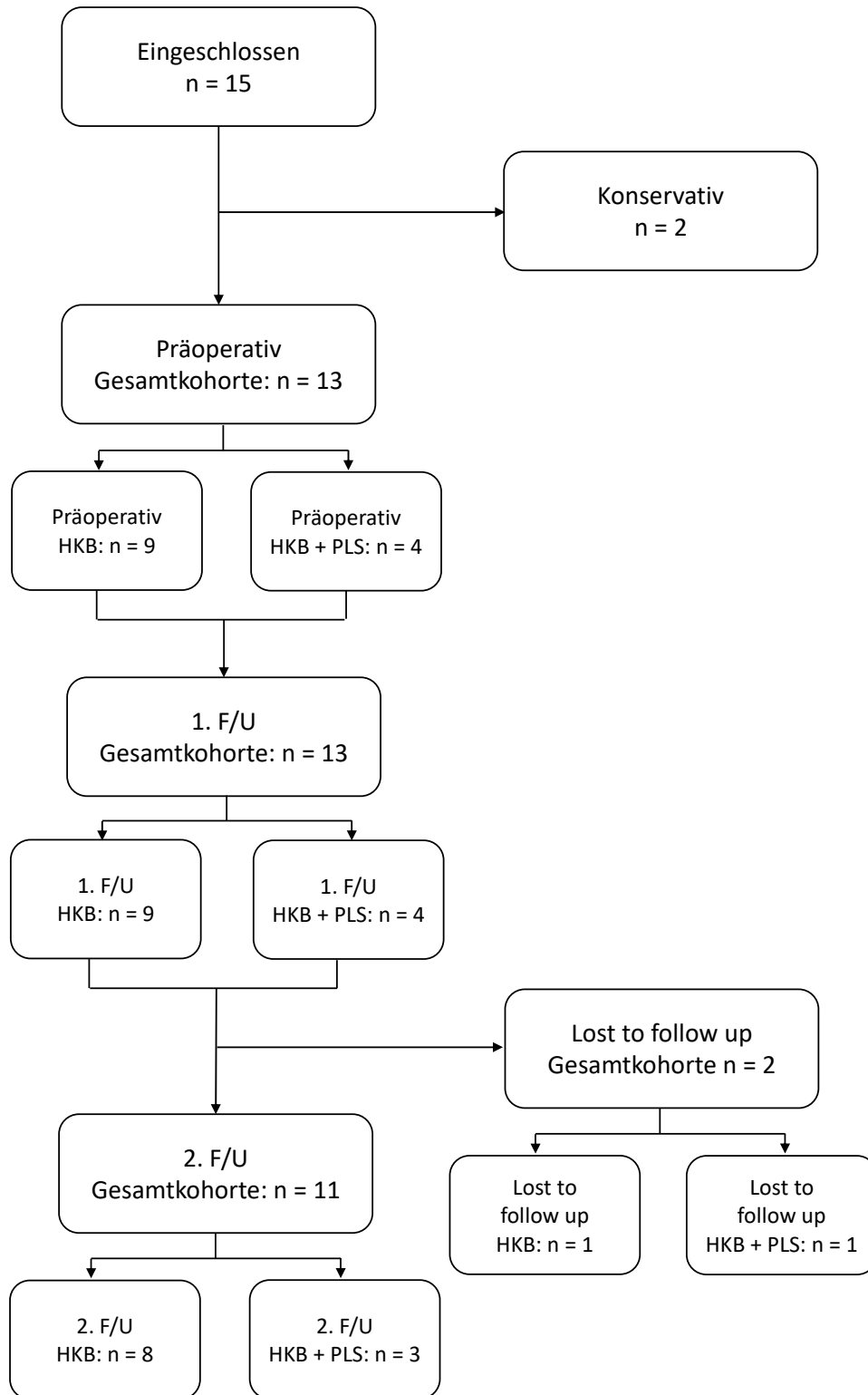


Abbildung 10: Flow Chart der Analyse des Patientenkollektivs
 (1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)
 Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit PLS (HKB + PLS)
 und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB)

2.2 Operative Versorgung

Alle 13 Patienten erhielten eine isolierte oder kombinierte Einzelbündelrekonstruktion des HKB. Davon erhielten 7 Patienten (53,8 %) eine isolierte Rekonstruktion des HKB und 3 Patienten (23,1 %) eine HKB-Rekonstruktion in Kombination mit einer posterolateralen Stabilisierung (PLS).

Ein Patient (7,7 %) erhielt eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer Einzelbündelrekonstruktion des VKB und einer PLS. Ein Patient (7,7 %) erhielt eine kombinierte HKB-Rekonstruktion in Kombination mit einer Einzelbündelrekonstruktion des VKB. Ein Patient (7,7 %) erhielt eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer Einzelbündelrekonstruktion des VKB und einer Rekonstruktion des MCL nach Lind (Abb. 11).¹⁵²

Bei einem Patienten, der eine isolierte Rekonstruktion des HKB erhalten hatte, wurde zusätzlich eine geringfügige Innenmeniskus-Teilresektion bis in die pars intermedia vorgenommen. Bei einem weiteren Patienten, der eine isolierte Rekonstruktion des HKB erhalten hatte, wurde ein Außenmeniskussubstanzverlust bei Zustand nach externer Außenmeniskusteilresektion diagnostiziert.

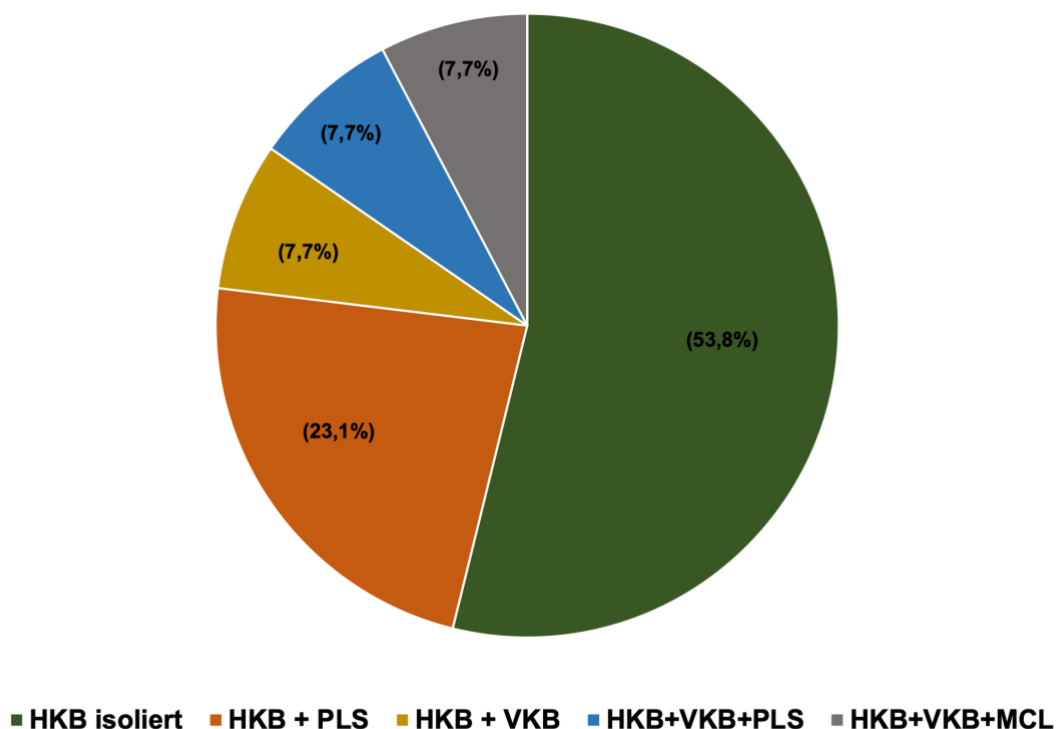


Abbildung 11: Anzahl der Patienten nach Art der Bandrekonstruktionen, n=13

2.2.1 Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes

Alle Probanden erhielten eine anatomische Einzelbündelrekonstruktion des AL-Bündels unter Verwendung eines fünffach gelegten Sehnentransplantats mit 3-fach gelegter Semitendinosussehne und 2-fach gelegter Gracilissehne.²⁰

Bei 12 Patienten (92,3 %) wurde ein autologes Transplantat, bei einem Patienten (7,7 %) ein allogenes Transplantat verwendet.

Die Rekonstruktionen wurden in tibialer Tunneltechnik mit femoraler Inside-Out-Technik durchgeführt. Die tibiale Fixierung erfolgte bei allen Patienten in Hybridtechnik mit einer bioresorbierbaren Interferenzschraube (Richard Wolf GmbH, Knittlingen, Deutschland) und anschließender Postfixation der Armierungsfäden über eine tibiale Knochenbrücke. Die femorale Fixierung erfolgte bei 9 Patienten in Hybridtechnik mit einer bioresorbierbaren Interferenzschraube und einer dem femoralen Anteil des Transplantats aufgeknöteten Polyaktid-Kugel (Endopearl®, Conmed, Utica NY, USA) (Abb. 12). Bei 3 Patienten erfolgte die femorale Fixierung mittels Endobutton System (Smith & Nephew plc., London, UK). Bei einem Patienten erfolgte die femorale Fixierung in Hybridtechnik mittels Endobutton System plus einer bioresorbierbaren Interferenzschraube (Abb. 13).



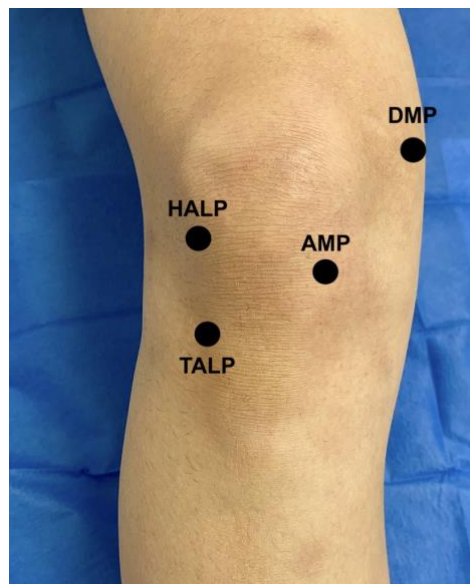
Abbildung 12: 5-fach gelegtes HKB Transplantat mit Polyaktid-Kugel (Endopearl®, Conmed, Utica NY, USA)²⁰



Abbildung 13: A) tibiale Fixierung mit Interferenzschraube und Postfixation über Knochenbrücke B) femorale Fixierung mit Interferenzschraube C) femorale Fixierung über Endobutton System¹³²

Bei allen Patienten erfolgte die Rekonstruktion in Augmentationstechnik unter Erhalt verbliebener Anteile des nativen HKB.^{153,154}

Für die Rekonstruktion wurden insgesamt vier Arthroskopieportale angelegt (Abb. 14). Über das hohe anterolaterale Portal (HALP) erfolgte die Diagnostik. Das tiefe anterolaterale Portal (TALP) diente zur Anfertigung des femoralen Bohrkanals. Das anteromediale Portal (AMP) diente vorwiegend als Arbeitsportal. Die Darstellung des HKB im Verlauf und dessen tibiale Insertion erfolgte über ein dorsomediales Portal (DMP).



**Abbildung 14: Arthroskopieportale der HKB-Rekonstruktion
- hohes anterolaterales Portal (HALP), tiefes anterolaterales Portal (TALP),
anteromediales Portal (AMP) und dorsomediales Portal (DMP)**

Die Transplantatentnahme erfolgte mit einem offenen Sehnenstripper (Karl Storz GmbH, Tuttlingen, Deutschland) nach einem Hautschnitt knapp unter dem Pes anserinus und anschließender Präparation des Entnahmegebiets. Die Mindestlänge der daraus angefertigten HKB-Transplantate betrug 10 cm und der Mindestdurchmesser 8 mm.²⁰ Nach Anfertigung des femoralen Tunnels wurde der tibiale Tunnel über die Transplantatentnahmestelle an der Tibia und das anteromediale Portal mit Hilfe eines tibialen Zielgerätes (Karl Storz GmbH) angefertigt. Dabei begann der Bohrkanal des Zieldrahtes auf Höhe der Tuberositas tibiae an der antero-medialen Tibiakopfkante und führte zur tibialen Insertion des HKB, ungefähr 12-14 mm caudal der dorsalen Tibiakante. Anschließend wurde das HKB-Transplantat mit Hilfe eines Passagefadens über den tibialen Bohrkanal eingeführt und in den femoralen Bohrkanal eingezogen. Darauf folgte die beschriebene femorale und danach die tibiale Fixierung des Transplantats. Nach schichtweisem Wundverschluss mit Einlegen einer intraartikulären Redon-Drainage und dem Anlegen eines Wundverbandes erfolgt die direkte Ruhigstellung in einer PTS-Orthese (medi GmbH & Co. KG, Bayreuth, Deutschland).

2.2.2 Stabilisierung der posterolateralen Gelenkecke

Vier Patienten erhielten eine Stabilisierung der posterolateralen Gelenkecke in nach Strobel modifizierter Technik nach Larson (Abb. 15).^{143,144} Bei allen vier Patienten wurde als Transplantat die Semitendinosussehne der Gegenseite verwendet. Zu Beginn wurde mit einer Mini-Inzision das Fibulaköpfchen freigelegt und unter Schutz des Nervus peroneus ein Bohrkanal mit 4.5 mm Durchmesser von ventral nach dorsal durch das Fibulaköpfchen angelegt. Über einen zweiten Hautschnitt oberhalb der lateralen Femurkondyle wurde der Tractus iliotibialis im Faserverlauf gespalten. Das Transplantat wurde anschließend durch das Fibulaköpfchen geleitet. Der optimale isometrische Punkt, welcher meist in der Nähe der lateralen Femurkondyle, am proximalen Ansatz des LCL liegt, wurde ermittelt und der femorale Bohrkanal angefertigt. Anschließend wurden die beiden Schenkel des Semitendinosus-transplantats in den femoralen Bohrkanal eingezogen und fixiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der dorsale Schenkel unterhalb des Tractus iliotibialis und der Bicepssehne verläuft. Die femorale Fixierung fand in 60° Kniebeugung, leichter Innenrotation und unter leichtem Valgusstress, sowie einer leichten nach anterior gerichteten Kraft auf den Unterschenkel statt. Die Fixierung erfolgte bei allen Patienten mittels einer bioresorbierbarer Interferenzschraube (Karl Storz GmbH) und einer dem Transplantat aufgeknöteten Polyaktid-Kugel (Endopearl®).

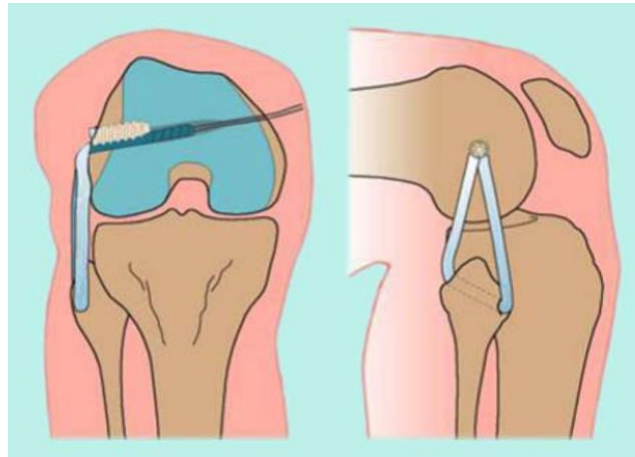
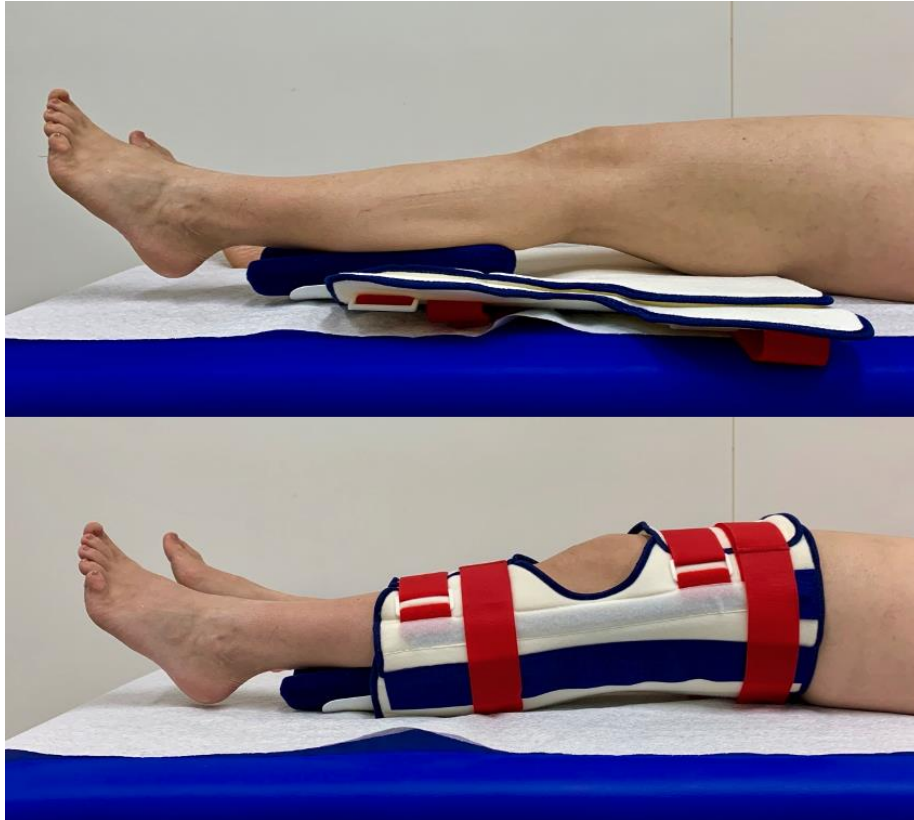


Abbildung 15: Stabilisierung der posterolateralen Gelenkecke in nach Strobel modifizierter Technik nach Larson²⁰

2.2.4 Nachbehandlungsprotokoll

Die Nachbehandlung der HKB-Rekonstruktion erfolgte bei allen Patienten nach einem einheitlichen Nachbehandlungsschema. Direkt postoperativ erfolgt die Ruhigstellung in einer PTS-Orthese, welche anschließend Tag und Nacht für 6 Wochen getragen wurde (Abb. 16). Die Kniegelenksdrainage wurde nach etwa 24 Stunden gezogen. In den ersten 6 Wochen erfolgte eine Mobilisierung unter 15 kg Teilbelastung an Unterarmgehstützen. Ab dem 2. postoperativen Tag wurde mit der Physiotherapie begonnen. Diese fand in den ersten 6 Wochen vorwiegend in Bauchlage statt. Nur in dieser Position durfte der Physiotherapeut die PTS-Orthese entfernen. Es wurde mit passiven Flexionsübungen begonnen, welche behutsam bis zum Ende der 6. Woche auf 90° Knieflexion gesteigert wurden. Das Nachbehandlungsprogramm wurde in den ersten 6 Wochen durch Kryotherapie, Lymphdrainage, isometrischen Quadrizepsübungen, Elektrotherapie und passiver Patellamobilisation ergänzt. Mit Beginn der 7. Woche erfolgte die Ruhigstellung tagsüber in einer funktionellen HKB-Orthese (DonJoy 4TITUDE® PCL, ORMED GmbH, Freiburg, Deutschland) mit freigegebener Knieflexion und unter Übergang zur Vollbelastung. Die PTS-Orthese wurde weiterhin zur Nacht getragen. Mit dem Ende der 12. Woche war die Orthesenbehandlung abgeschlossen. Mit lockerem Laufen konnte ab dem 6. Monat begonnen werden. Der Beginn von Kontaktsportarten sollte erst nach einem Jahr bei annähernd gleicher Kniegelenksfunktion im Vergleich zur gesunden Gegenseite erfolgen.



**Abbildung 16: Die PTS-Orthese immobilisiert das Kniegelenk in Extensionsstellung
Das tibiale Inlay sorgt für eine Reduktion der posterioren Subluxation.**

2.3 Subjektive Beurteilung durch Fragebögen

2.3.1 IKDC 2000 – Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Knies

Das IKDC (International Knee Documentation Committee) wurde 1987 gegründet um einen standardisierten, internationalen Score für den Gesundheitszustand des Kniegelenkes zu entwickeln. Die erste Version wurde 1993 publiziert.¹⁵⁵ Für diese Studie wurde die aktuellste Version, der „IKDC 2000 – Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Kniegelenkes“ angewendet.¹⁵⁶ Er gliedert sich in die Bereiche Symptome, sportliche Betätigung und Funktion des Kniegelenkes. Zur Auswertung werden den Antworten jeweils Punkte zugeordnet, wobei dem niedrigsten funktionellen Level 0 Punkte zugeordnet werden und zu jeder Antwort mit dem nächsthöheren funktionellen Level jeweils ein Punkt addiert wird. Die Einzelpunkte werden dann auf eine Gesamtpunktzahl addiert und auf eine Skala von 0 bis 100 transformiert.¹⁵⁷

2.3.2 Lysholm Score

In dieser Studie wurde der modifizierte Score nach Lysholm von 1985 verwendet.¹⁵⁸ Der Score erfragt die Kniegelenksgesundheit in 8 Kategorien, wobei jede Kategorie eine eigene Wertung erhält. Die Auswertung erfolgt durch die Addition der Werte der verschiedenen Kategorien auf eine Punktzahl zwischen 0 und 100. Dabei stellen 0 Punkte die größtmögliche Beeinträchtigung dar, während 100 Punkte keinerlei Beeinträchtigung bedeuten.

2.3.3 Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)

Zur Analyse unterschiedlicher Dimensionen der Kniegelenksgesundheit wurde der Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), Austria/German Version LK1.0 verwendet. Der KOOS-Score besteht aus fünf Kategorien mit insgesamt 42 Fragen.¹⁵⁹ Jeder Frage sind fünf Antwortmöglichkeiten zugeordnet, die jeweils mit der Punktzahl 0-4 gewertet werden. Alle 5 Kategorien können separat berechnet werden. Für ein Gesamtergebnis wird das Ergebnis der 5 Kategorien auf 100 transformiert, wobei der Wert 100 völliger Symptommfreiheit und 0 dem Wert mit den stärksten Knieproblemen entspricht.

2.3.4 SF-36

Zur Analyse der allgemeinen gesundheitsbezogenen Lebensqualität wurde der SF-36 (Short Form Health 36) Version 01 verwendet.¹⁶⁰ Der SF-36 besteht aus 36 Fragen und kann sowohl den allgemeinen Gesundheitszustand, als auch den Gesundheitszustand in 8 verschiedenen Dimensionen abbilden. Zusätzlich enthält der SF-36 auch eine Frage, die die wahrgenommene Veränderung des Gesundheitszustands im letzten Jahr bewertet. Der Score ist hochvalide und wird in vielen Fachbereichen eingesetzt.¹⁶¹ Die Auswertung erfolgt nach einer Rekodierungstabelle. Die errechnete Punktzahl entspricht einem Wert auf einer Skala von 0 bis 100, wobei 0 die größtmögliche Einschränkung der Gesundheit und 100 das Ausbleiben von Einschränkungen in der Gesundheit darstellt. Der Gesamtscore wurde in dieser Studie als Mittelwert der Einzelwerte der 8 Dimensionen definiert.¹⁶²

2.4 Bildgebung

2.4.1 Stressradiographie

Von jeweils 12 Patienten lagen von beiden Kniegelenken präoperative und postoperative radiologische Stressaufnahmen zur Auswertung vor. Von einem Patienten lagen keine verwertbaren Aufnahmen zur präoperativen Analyse der HSL vor. Ein weiterer Patient stand für die Stressradiographie im postoperativen Verlauf nicht zur Verfügung (lost to follow up). Die radiologischen Stressaufnahmen wurden mit einem Haltegerät nach Prof. Dr. Scheuba (Fa. Telos GmbH, Marburg, Deutschland) angefertigt (Abb. 17).



Abbildung 17: Haltegerät zum Anfertigen gehaltener Röntgenaufnahmen nach Prof. Dr. Scheuba¹⁵

Die Aufnahmen dienen der Quantifizierung der anterioren und posterioren Translation der Tibia gegenüber dem Femur.¹⁰⁶ Dabei wird der Patient in Seitenlage gelagert und das Bein in 90° Kniebeugung fixiert. Aus dieser Position wird mit einem Stempel eine Kraft von 150 N jeweils nach posterior und anterior auf die proximale Tibia appliziert. Währenddessen wird ein Röntgenbild mit einem Strahlengang von medial nach lateral angefertigt.¹⁵ Die Auswertung der Stressradiographie erfolgte nach Jacobsen (Abb. 18).¹⁶³



Abbildung 18: Auswertung der HSL nach Jacobsen

Dabei wird eine Gerade auf das Tibiaplateau projiziert. Zwei weitere Geraden werden jeweils durch den Mittelpunkt der am weitesten posterior gelegenen Knochenpunkte der lateralen und medialen Femurkondyle und des lateralen und medialen Tibiaplateau gezogen. Diese beiden Geraden werden senkrecht zur Geraden auf dem Tibiaplateau angelegt. Die Strecke zwischen diesen beiden Senkrechten stellt die AP-Translation der Tibia zum Femur und damit die HSL und VSL dar. Diese wird in Millimeter ausgemessen. Ermittelt wird immer die Differenz zur Gegenseite, da hier im physiologischen Zustand keine signifikanten Unterschiede vorkommen.¹⁶³

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte durch zwei voneinander unabhängig arbeitende Untersucher, welche zuvor ausführlich in die Analyse der gehaltenen Aufnahmen eingearbeitet wurden. Zur Analyse wurde das arithmetische Mittel der Ergebnisse von beiden Untersuchern herangezogen.

2.4.2 Magnetresonanztomographie

Als Grundlage zur Erstellung einer dreidimensionalen Darstellung des Kniegelenkes, aus dem dann im weiteren Verlauf die *in vivo* Rotation ermittelt wurde, wurden sowohl vom gesunden als auch vom HKB-insuffizienten Kniegelenk eine MRT-Bildgebung angefertigt (Abb. 19). Für das Anfertigen der MRT-Bildgebung des HKB-insuffizienten Kniegelenkes wurde ein Magnetom Avanto 1.5 Tesla MRT-Gerät (Siemens Healthcare Diagnostics GmbH, Eschborn, Deutschland) verwendet. Die MRT-Bildgebung des gesunden Kniegelenkes erfolgte mit einem Magnetom Aera 1.5 Tesla MRT-Gerät (Siemens

Healthcare Diagnostics GmbH, Eschborn, Deutschland). Um die tibiale und femorale Kortikalis möglichst genau darzustellen und daraus die 3D-Rekonstruktionen der knöchernen Gelenkpartner zu erstellen, wurde folgende MRT-Sequenz angewendet, welche in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologie - Charité Mitte und dem Zuse Institut Berlin speziell für diese Studie ausgearbeitet wurde: Protonengewichtete 3D-Messung, Schichtdicke: 0,6 mm; Voxelgröße: 0.46875 mm x 0.46875 mm x 0,6 mm; time to repeat (TR): 1200 ms, time to echo (TE): 36 ms; Basisauflösung 448, Field of View 200 mm, Flipwinkel 120°; 160 Schichten.

Das Field of View wurde bei jeder Aufnahme kontrolliert und bei Bedarf durch die Anpassung der Schichtanzahl so angelegt, dass das gesamte knöchernen Kniegelenk einschließlich des Fibulakopfes und ausreichend große Anteile von Femur- und Tibiaschaft enthalten waren



Abbildung 19: Sagittale T1-gewichtete MRT-Aufnahme eines Probanden mit HKB-Ruptur

2.5 Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität

2.5.1 Knee Rotometer

Die Messung der passiven tibiofemorale Rotationsstabilität erfolgte an einer am JWI eigens dafür entwickelten und validierten Vorrichtung (Knee Rotometer), welches nach dem deutschen Medizinproduktegesetz für die Anwendung am Menschen zertifiziert wurde (Berlin Cert Prüf- und Zertifizierstelle für Medizinprodukte GmbH; Zertifikat Reg.Nr. Z-11-131-MP) (Abb. 20).^{100,150,151}

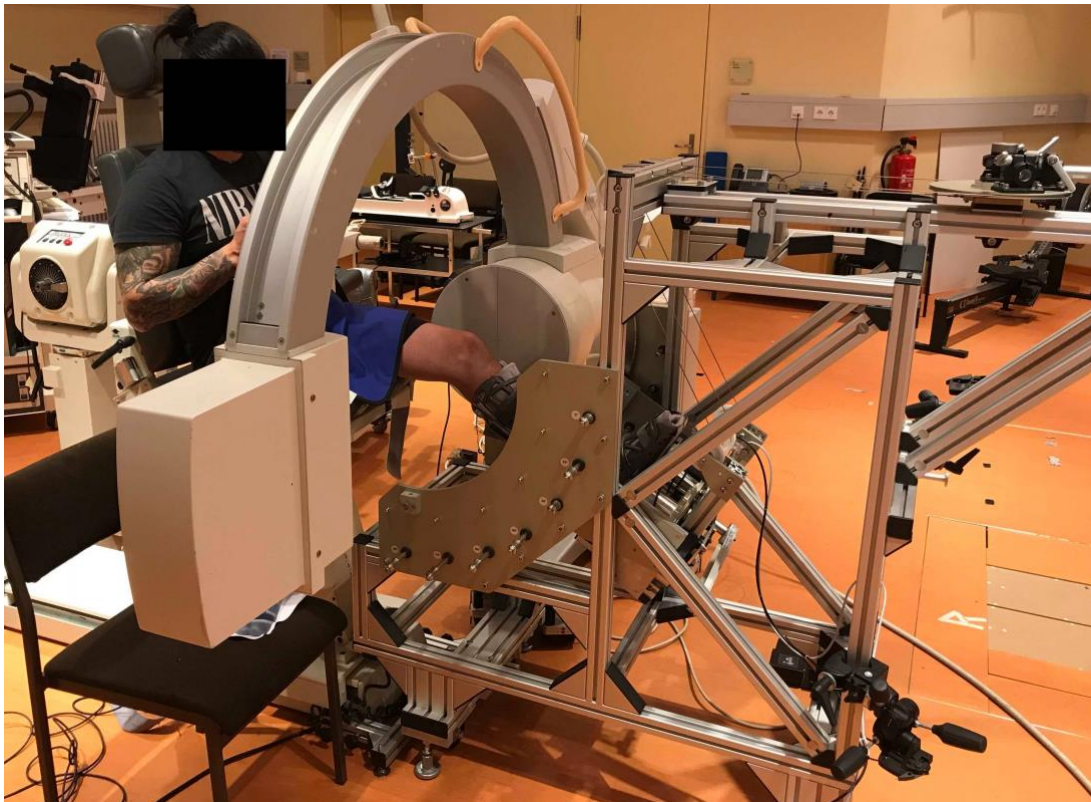


Abbildung 20: Am Julius Wolff Institut entwickelter und evaluierter Knee Rotometer

Während des Messvorgangs befand sich der Proband bequem und sicher in einer sitzenden Position (Biodex system 4, Biodex Medical Systems Inc., Shirley, USA). Der Oberschenkel und der Oberkörper wurden mit Hilfe eines Gurtes festgeschnallt. Der Fuß und der Unterschenkel des Probanden wurden in einem Vacoped (OPED GmbH) fixiert (Abb. 21).



Abbildung 21: Vacoped zur Fixierung des Unterschenkels

Der Vacoped ist auf einer Rotationsplattform mit einem installierten 6-DOF (degrees of freedom) - Kraft-Momenten-Sensor (ATI Industrial Automation, Apex, USA; Messgenauigkeit: 0.06 Nm) montiert, welcher applizierte Kräfte und Drehmomente an 3 Achsen und damit den für die Errechnung der Rotationsstabilität wichtigen Drehmoment um die axiale Achse misst.

Über eine Seilzugvorrichtung wurde manuell ein axiales Drehmoment auf die Rotationsplattform und damit auf das Kniegelenk appliziert (Abb. 22).

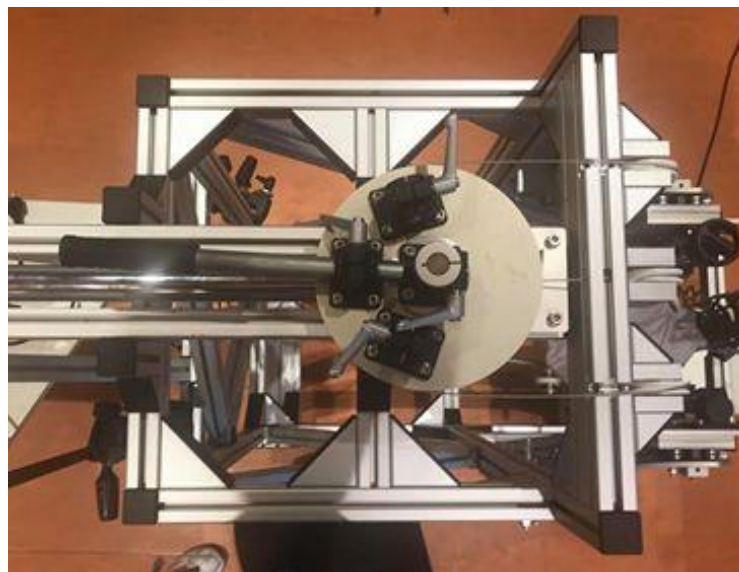


Abbildung 22: Seilzugvorrichtung des Knie Rotometer zur Applizierung eines axialen Drehmomentes auf die Rotationsplattform und damit auf das Kniegelenk

Durch die Fixierung sowohl des Oberschenkels als auch des Fußes und des Unterschenkels konnte sichergestellt werden, dass Bewegungen im Hüftgelenk und Sprunggelenk minimiert wurden und die passive Rotation fast ausschließlich im Kniegelenk erfolgte.

Als Parameter wurde ein axiales Drehmoment von 3 Nm gewählt um eine aussagekräftige, aber schonende Simulation einer manuellen, klinischen Testung der tibiofemorale Rotationsstabilität wie z.B. beim Dial-Test zu erreichen. Dieses Drehmoment wurde schon in diversen *in vivo* und *in vitro* Studien erfolgreich zur Analyse der tibiofemorale Rotationsstabilität angewendet.^{58,101,122,151,164} Ein auditiver Feedback-Mechanismus signalisierte die 3 Nm Schwelle. Auf diese Weise wurde das Ende des Messzyklus angezeigt und zusätzlich eine übermäßige Rotation verhindert. Weiterhin sorgte eine eingebaute Barriere dafür, dass keine Rotation der Plattform über 45° möglich war. Jede Messung begann in der individuellen Ruheposition des jeweiligen Probanden und umfasste den gesamten tibiofemorale Rotationsumfang bei einem Drehmoment von 3 Nm sowohl für die Innen- als auch für die Außenrotation. So wurde aus der Ruheposition zuerst das externe Drehmoment für die Innenrotation appliziert. Sobald der auditive Feedbackmechanismus die 3 Nm-Schwelle signalisierte, wurde die Rotationsrichtung geändert und der Unterschenkel in die Außenrotation gebracht, bis der auditive Feedbackmechanismus die 3 Nm-Schwelle für die Außenrotation angab. Anschließend wurde der Unterschenkel wieder zurück in die individuelle Ruheposition gebracht und der Messzyklus war damit beendet.

Dieser Messvorgang wurde jeweils dreimal in 90°, 60° und 30° Kniebeugung durchgeführt. Die 30°-Position wurde gewählt, da hier vorrangig die Strukturen der posterolateralen Gelenkecke die femorotibiale Außenrotation inhibieren. Die 90° Position wurde gewählt, da hier das HKB gespannt ist und es in Kombination mit den Strukturen der posterolateralen Gelenkecke die femorotibiale Außenrotation inhibiert. Die 60°-Position wurde gewählt um die femorotibiale Rotationsstabilität zwischen den beiden Positionen zu analysieren.⁶² Die Intratester-Reliabilität der manuellen Applikation des axialen Drehmoments wurde mit dem Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC 3,1) bestimmt und beträgt 0.98.¹⁰⁰

Jede Messung wurde vom gleichen Team bestehend aus zwei Untersuchern durchgeführt, die zuvor intensiv in die Messtechnik eingeführt wurden. Kein Proband empfand die Messung als unangenehm oder gab Schmerzen während des Messvorgangs an. Während der Messung wurden die Probanden angehalten sich zu

entspannen. Etwaige Anspannungen der Oberschenkelmuskulatur konnten sofort über Störungen der zeitgleich mitlaufenden Aufzeichnung der Kraftdaten erkannt werden. In den seltenen Fällen, wo dies geschah, wurde der Messzyklus wiederholt.

Zusätzlich zur Erhebung der Kraftdaten wurde eine synchrone Fluoroskopie der tibiofemorale Rotation mit einem mobilen C-Bogen-System (BV Pulsera, Philips GmbH Health Systems, Hamburg, Deutschland) durchgeführt. Dabei wurde der Bildverstärker lateral auf Höhe des Kniegelenkes platziert und es wurden Aufnahmen mit einer Frequenz von 5Hz im gepulsten Modus während des gesamten Messzyklus angefertigt (Abb. 23). Eine Genehmigung des Bundesamtes für Strahlenschutz wurde beantragt und lag bei Studienbeginn vor (Genehmigungsnummer: Z5-22462/2-2014-096).



Abbildung 23: Synchrone Fluoroskopie der tibiofemorale Rotation mit einem mobilen C-Bogen-System (BV Pulsera, Philips GmbH Health Systems, Hamburg)

Zur Synchronisierung der Kraftdaten mit der Fluoroskopie wurde ein Streustrahlensensor (Typ F50-MCS, Silicon Sensor International AG, Berlin, Verzögerung: 50 ns) verwendet, welcher an den Bildverstärker des C-Bogen-Systems montiert wurde. Dieser registrierte anhand der Streustrahlung jedes aufgenommene Bild und leitete das Signal durch eine Analog-Digital-Wandler-Messkarte (National Instruments, Austin, USA) an das Programm Knieprüfstand (Labview, National Instruments, Austin, USA) weiter, welches als digitale Bedienungschnittstelle sowohl die Fluoroskopie als auch die synchronen Kraftdaten der Kraftmessdose erfasste und aufzeichnete. Auf diese Weise konnte jede

fluoroskopisch erhobene Aufnahme exakt den dabei ermittelten Kraftdaten zugeordnet werden. Zur Kalibrierung und zum Ausgleich der Pincushion-Verzerrung der Fluoroskopie wurde vor jedem gemessenen Kniegelenk eine Kalibrierungsaufnahme mit Hilfe eines Kalibrierungswürfels aus Plexiglas (BAAT Engineering B.V., Hengelo, Niederlande) angefertigt.¹⁶⁵ Die Entzerrung der Kalibrierungsaufnahmen erfolgte mit dem Programm Model Based RSA Version 3.3 (Medis specials, Leiden, Niederlande).

2.5.2 Fluoroskopisch basierte Ermittlung der tibiofemorale *in vivo* Rotation

In Zusammenarbeit mit dem Zuse Institut Berlin erfolgte aus den MRT-Daten und der Fluoroskopie die Ermittlung der tibiofemorale *in vivo* Rotation (Abb. 24)

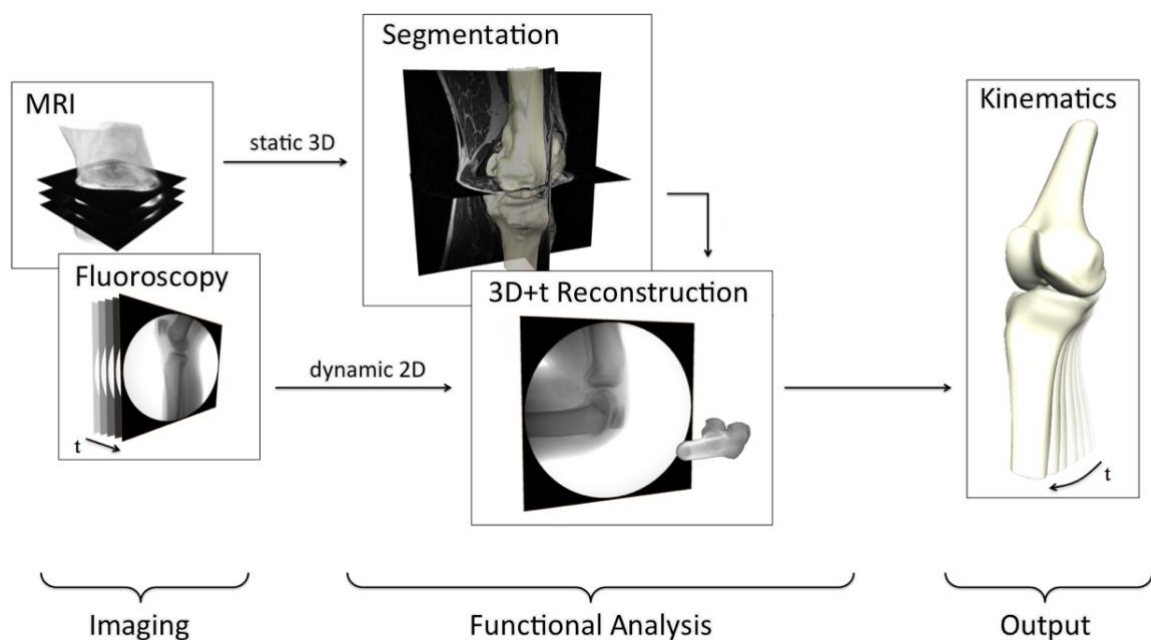


Abbildung 24: Workflow zur Ermittlung kinematischer *in vivo* Daten aus MRT-Daten und Fluoroskopie

Im ersten Schritt wurde aus den MRT-Daten für jedes Kniegelenk eine virtuelle, patientenspezifische dreidimensionale Rekonstruktion der Knochenoberflächen erstellt. Dies geschah durch die Segmentierung der Knochenoberflächen aus den vorhandenen MRT-Daten. Hierbei wurde ein automatisiertes Verfahren mittels eines computerbasierten Convolutional Neural Network angewendet. Dabei wurde eine U-Net-Architektur verwendet, welches derzeit zu den modernsten Segmentierungsverfahren für biomedizinische Bildverarbeitung zählt.¹⁶⁶ Die somit automatisch erstellten

Rekonstruktionen der individuellen Anatomie der Knochenoberflächen haben einen Dice-Koeffizienten von mind. 96 % erzielt. Jede Rekonstruktion wurde anschließend mit dem Programm Amira (Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) in konventioneller Weise manuell kontrolliert und nachbearbeitet, um Segmentierungsfehler auszuschließen und die erstellten Rekonstruktionen bei Bedarf zu optimieren (Abb. 25).

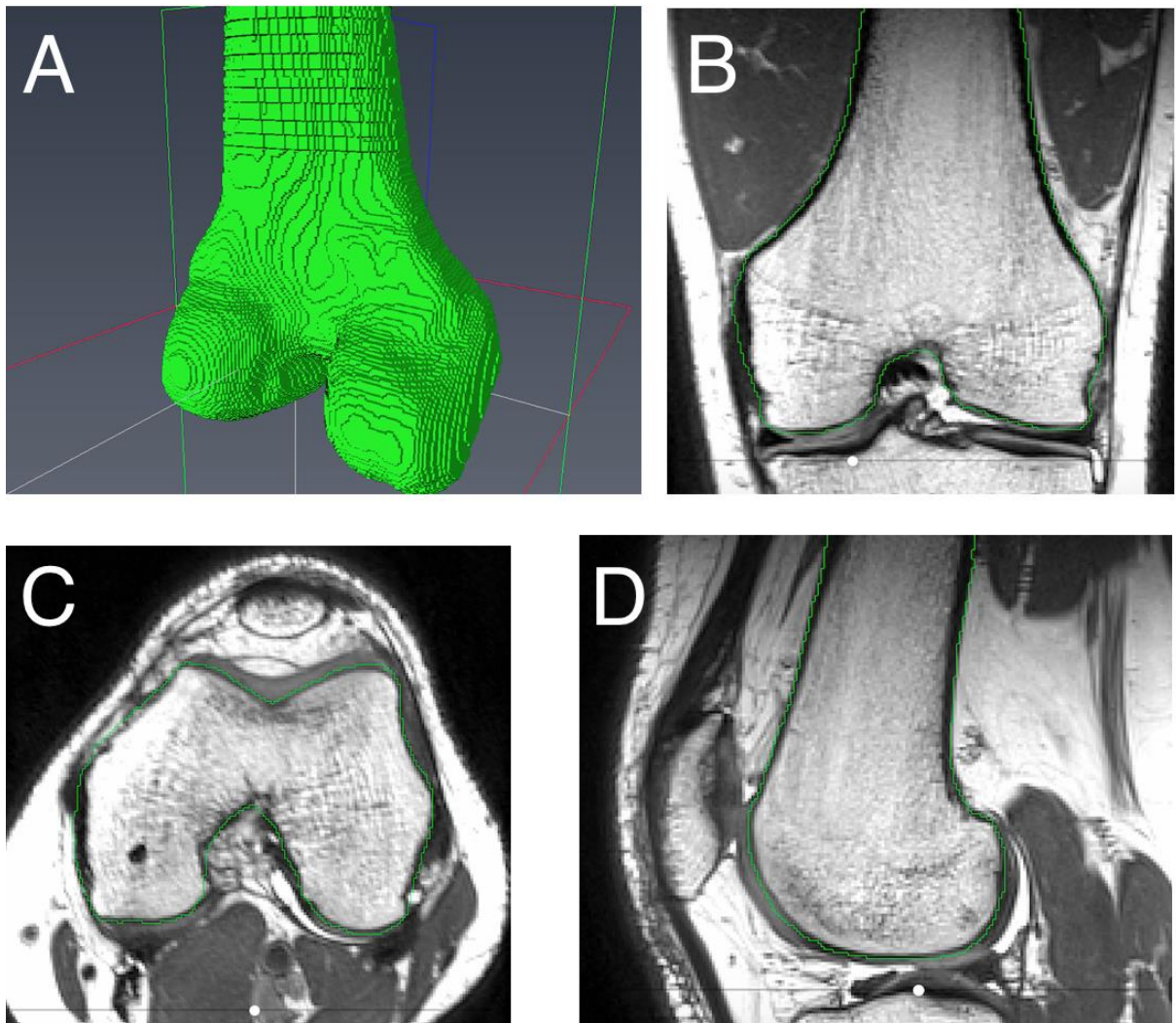


Abbildung 25: 3D-Rekonstruktion der individuellen Gelenkanatomie

A) Femorale 3D-Rekonstruktion aus segmentierten MRT-Daten B-D) Segmentierung der Knochenoberflächen von MRT-Daten aus koronarer (B), axialer (C) und sagittaler (D) Bildgebung

Im nächsten Schritt wurden die erstellten 3D-Rekonstruktionen der individuellen Gelenkanatomie in Korrelation zur Fluoroskopie gebracht. Auf diese Weise wurden die Positionen der Gelenkelemente innerhalb des fluoroskopischen Aufbaus bestimmt. Dies erfolgte anhand einer intensitätsbasierten 2D-3D-Registrierungsmethode.^{167,168} Dabei wurde die Position und Rotation des patientenspezifischen dreidimensionalen

Computermodells optimiert, so dass eine maximale Übereinstimmung zwischen dem computersimulierten Röntgenbild und der Fluoroskopie erzielt wurde (Abb. 26).^{168–171}

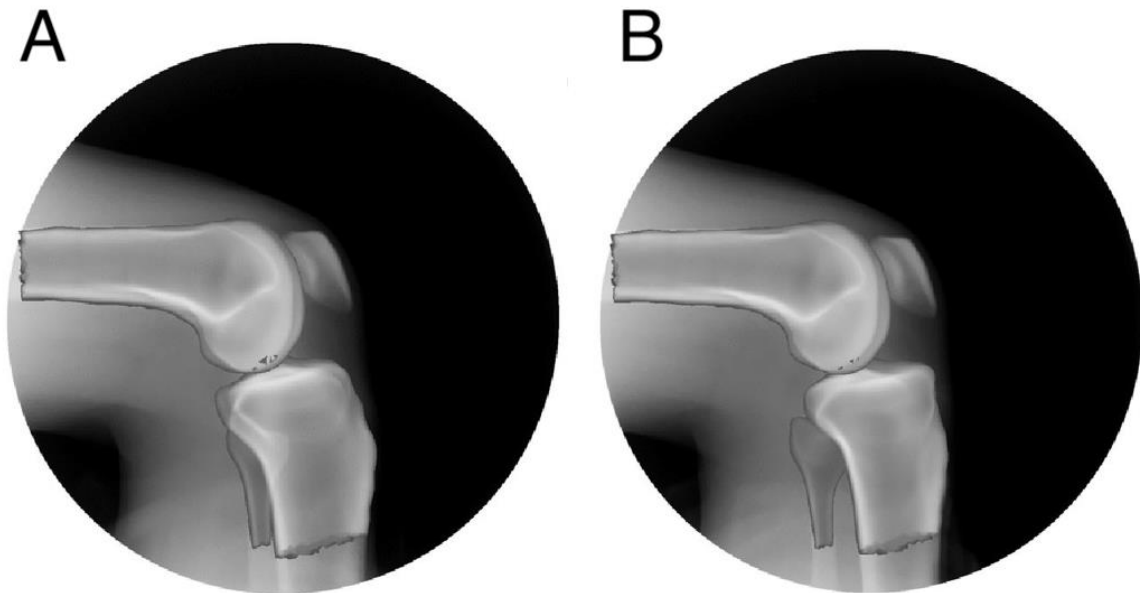


Abbildung 26: Fluoroskopieaufnahmen mit erstellter und angepasster 3D-Gelenkrekonstruktion in Ausgangsposition (A) und tibiofemoraler Außenrotation (B)

Das Ergebnis der optimalen Anpassung der von den MRT-Daten ermittelten Knochenoberflächen von Femur und Tibia an die Fluoroskopie-Messungen lieferte somit für jeden Zeitpunkt die präzisen Positionen der beiden Segmente als Transformationen (Translationen und Rotationen) innerhalb eines gemeinsamen Koordinatensystems. Mit Hilfe des von Ehrig et al. entwickelten SARA-Algorithmus (symmetrical axis of rotation approach) ließen sich aus diesen Transformationen die Hauptachsen der Bewegung und somit die Rotationsgrade bestimmen.¹⁷² Die Messgenauigkeit der Ermittlung der direkten tibiofemorale Rotation bewegt sich je nach Knieflexionswinkel im Bereich von $0,5^\circ - 1^\circ$.^{100,150}

2.5.3 Darstellung der tibiofemorale Rotationsstabilität

Da eine Synchronisation der Fluoroskopie mit den Kraftdaten während der Messung erfolgte, konnten die ermittelten Rotationswerte der einzelnen Fluoroskopieaufnahmen den Kraftdaten zugeordnet werden. Aus den synchronisierten Kraft- und Rotationswerten wurde für jede einzelne Messung mit der Software MS Excel (Version 2016, Microsoft,

Redmond, USA) eine Hysterese erstellt, welche das Systemverhalten des Kniegelenkes auf das angewendete Drehmoment abbildet (Abb. 27).

Um den Effekt der unterschiedlichen tibiofemorale Rotationswinkel der individuellen Ruhepositionen der Probanden auszugleichen, wurden die Hysteresen gemittelt. Dazu wurde der neutrale Referenzwinkel und damit Mittelpunkt jeder Hysterese als der Mittelwert der beiden Winkel bei 0 Nm definiert.

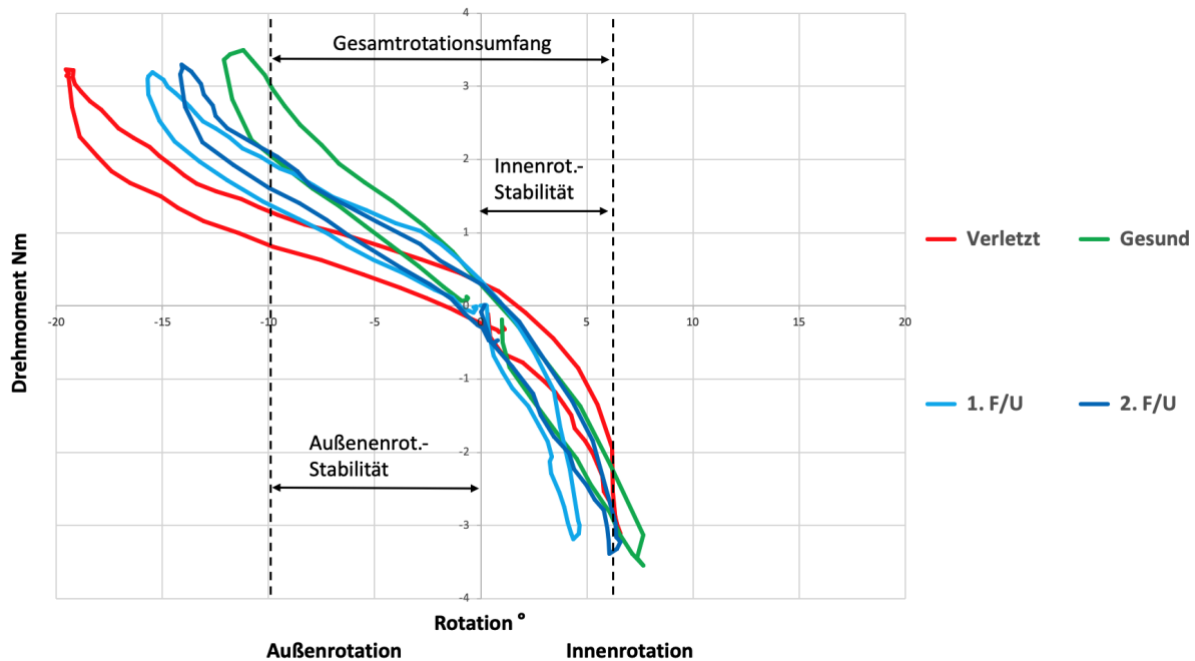


Abbildung 27: Gegenübergestellte Hysteresen eines Probanden für das gesunde Kniegelenk, das verletzte Kniegelenk, 1. F/U (6 Monate postoperativ) und 2. F/U (12 Monate postoperativ). Für die Hysterese des gesunden Kniegelenkes ist der Gesamtrotationsumfang sowie die Innen- und Außenrotation bei 3 Nm dargestellt

Aus den erstellten Hysteresen konnte man die passive tibiofemorale Rotationsstabilität ablesen. Dazu wurden die Rotationswerte jeder Hysterese bei einem axialen Drehmoment von 3 Nm in der belasteten Phase sowohl für die tibiofemorale Innen- als auch für die tibiofemorale Außenrotation ermittelt. Aus den Werten der drei nacheinander durchgeführten Messungen für jeden Knieflexionswinkel wurde jeweils für die Innen- als auch Außenrotationsstabilität der arithmetische Mittelwert gebildet und zur Analyse herangezogen.

2.6 Statistik und Datenanalyse

Die statistische Analyse und die graphische Darstellung erfolgte mit der Software GraphPad Prism (Version 8, Graphpad Software, La Jolla, USA). Um die jeweiligen Unterschiede im arithmetischen Mittelwert der Gesamtkohorte zu analysieren, wurden die Daten mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Test auf das Vorliegen einer Normalverteilung geprüft. Konnte diese nicht abgelehnt werden, wurde ein doppelter T-Test für verbundene Stichproben angewendet. Zur weiteren Analyse der tibiofemorale Rotationsstabilität wurde die untersuchte Gesamtkohorte in zwei Gruppen aufgeteilt. Die eine Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten mit einer Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS. Die andere Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS. Zur Analyse der Subgruppen untereinander wurde der Wilcoxon-Test für die Analyse innerhalb einer Subgruppe sowie der Mann-Whitney-U-Test für die Analyse zwischen den Subgruppen angewendet. Aufgrund des explorativen Charakters der Studie wurde nicht auf multiples Testen kontrolliert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung des Patientenkollektivs

3.1.1 Epidemiologie

Die Analyse der epidemiologischen Daten ist in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: Epidemiologische Daten der untersuchten Patientenkohorte

Patienten-ID	Geschlecht	Alter	BMI	Zeit Unfall bis OP in Monaten	Seite
1	m	47	26,1	20	re
2	w	48	19,7	7	re
3	m	18	25,4	10	re
4	m	45	27,3	5	re
5	m	38	24,8	7	re
6	m	43	29,3	5	li
7	m	35	21,4	5	li
8	w	24	19,8	5	li
9	m	35	28,0	147	li
10	m	28	28,1	6	re
11	m	34	28,0	42	re
12	m	38	29,1	4	re
13	m	46	34,2	10	re
MW	-	36,84	26	21	-
SD	-	8,90	3,93	39,25	-

3.1.2 Unfallursache

Die Unfallursache der Probanden der untersuchten Patientenkohorte ist in Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Unfallursache der untersuchten Patientenkohorte

Unfallursache	Anzahl
Fußball	5
Skifahren	2
Rugby	1
Motorradunfall	2
Fahrradunfall	3

Insgesamt zogen sich 8 Probanden (61,5 %) die Verletzung bei einer sportlichen Tätigkeit zu. Bei 5 Probanden (38,5 %) entstand die Verletzung durch einen Verkehrsunfall.

3.2 Auswertung der subjektiven Kniebeurteilung durch Fragebögen

3.2.1 IKDC 2000 – Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Knies

In der Auswertung der subjektiven Beurteilung des Kniegelenkes nach IKDC 2000 betrug der präoperative Wert im arithmetischen Mittel 56,6 Punkte ($\pm 16,6$). Beim ersten Follow up wurde ein Anstieg des Mittelwertes auf 63,1 Punkte ($\pm 13,9$) verzeichnet. In der Auswertung des zweiten Follow up zeigte sich ein weiterer signifikanter Anstieg auf 70,7 Punkte ($\pm 11,2$; $p = 0,02$) (Abb. 28).

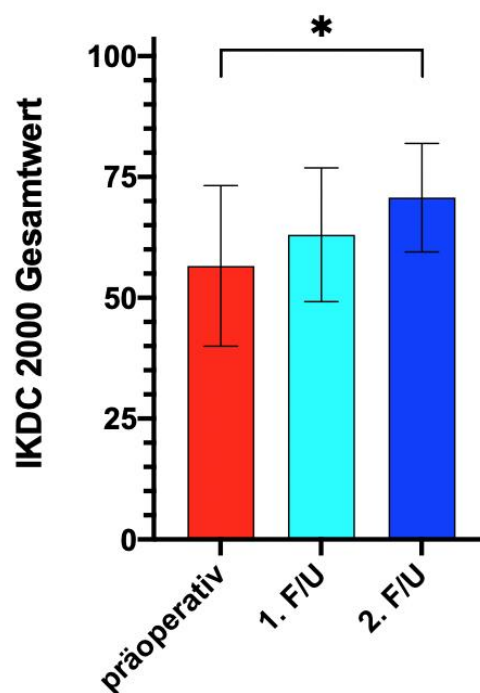


Abbildung 28: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit nach IKDC 2000 präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)

3.2.2 Lysholm Score

In der Auswertung des Lysholm Score betrug der präoperative Wert im arithmetischen Mittel 65,2 Punkte ($\pm 20,1$). Beim ersten Follow up wurde ein Anstieg des Mittelwertes auf 75,1 Punkte ($\pm 18,6$) verzeichnet. In der Auswertung des zweiten Follow up zeigte sich ein weiterer Anstieg auf 81,6 Punkte ($\pm 12,9$; $p = 0,06$) (Abb. 29).

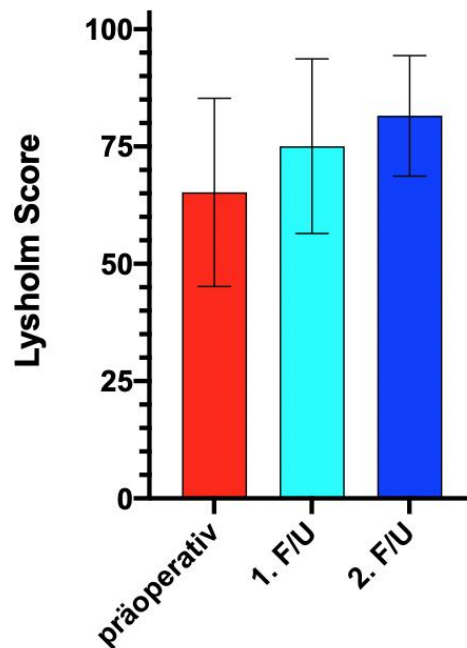


Abbildung 29: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit anhand des Lysholm Score präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)

3.2.3 Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)

In der Auswertung des Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score betrug der präoperative Wert der Gesamtpunktzahl im arithmetischen Mittel 65,4 Punkte ($\pm 16,6$). Beim ersten Follow up wurde ein Anstieg des Mittelwertes der Gesamtpunktzahl auf 73,2 ($\pm 16,6$) verzeichnet. In der Auswertung des zweiten Follow up zeigte sich ein weiterer signifikanter Anstieg auf 75,4 ($\pm 14,3$; $p = 0,04$) (Abb. 30).

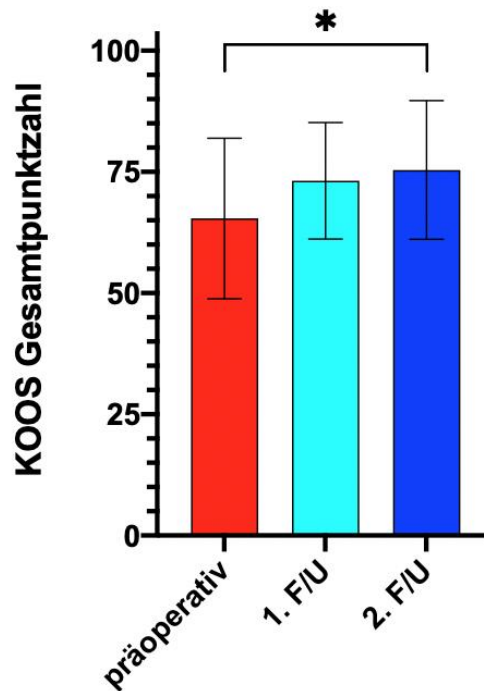


Abbildung 30: Subjektive Beurteilung der Kniegelenksgesundheit anhand der KOOS Gesamtpunktzahl präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)

Die ermittelten Werte in den Subkategorien des KOOS Score sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 31):

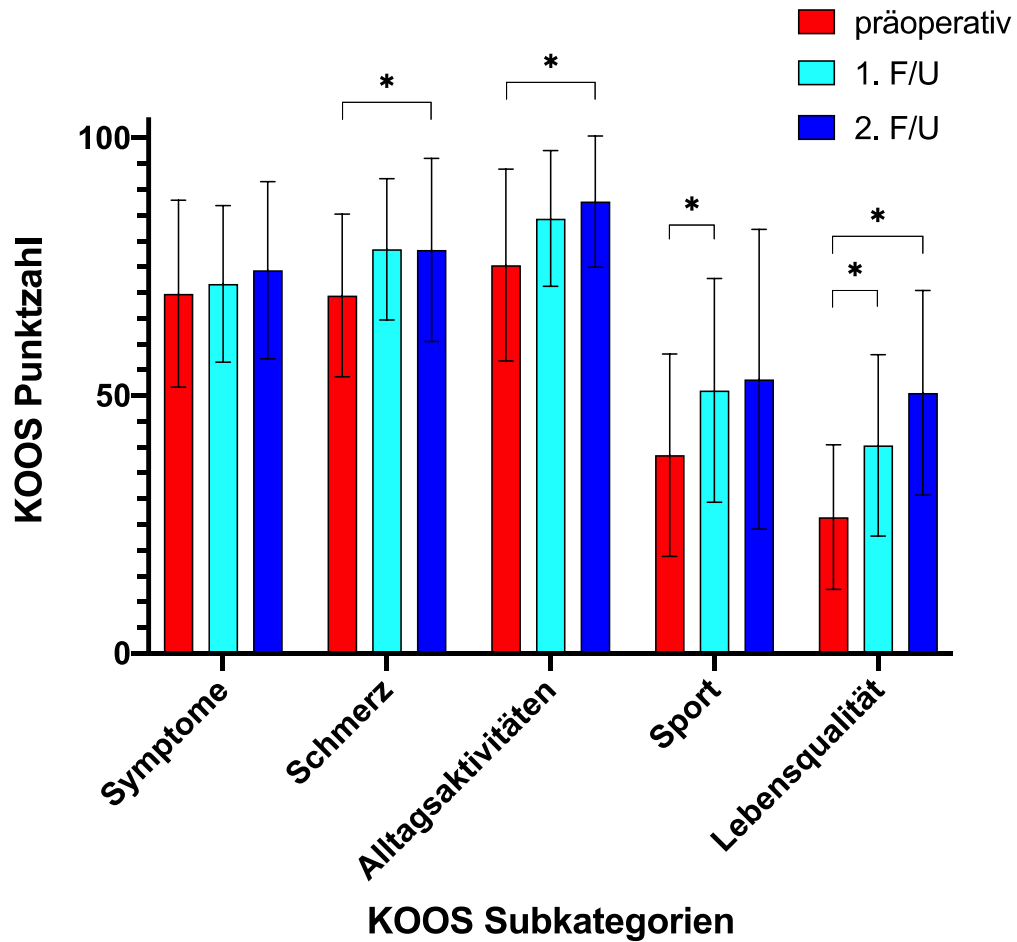


Abbildung 31: Auswertung der KOOS Subkategorien präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)

3.2.4 SF-36

Die ermittelten Werte in den Subkategorien des SF-36 sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 32).

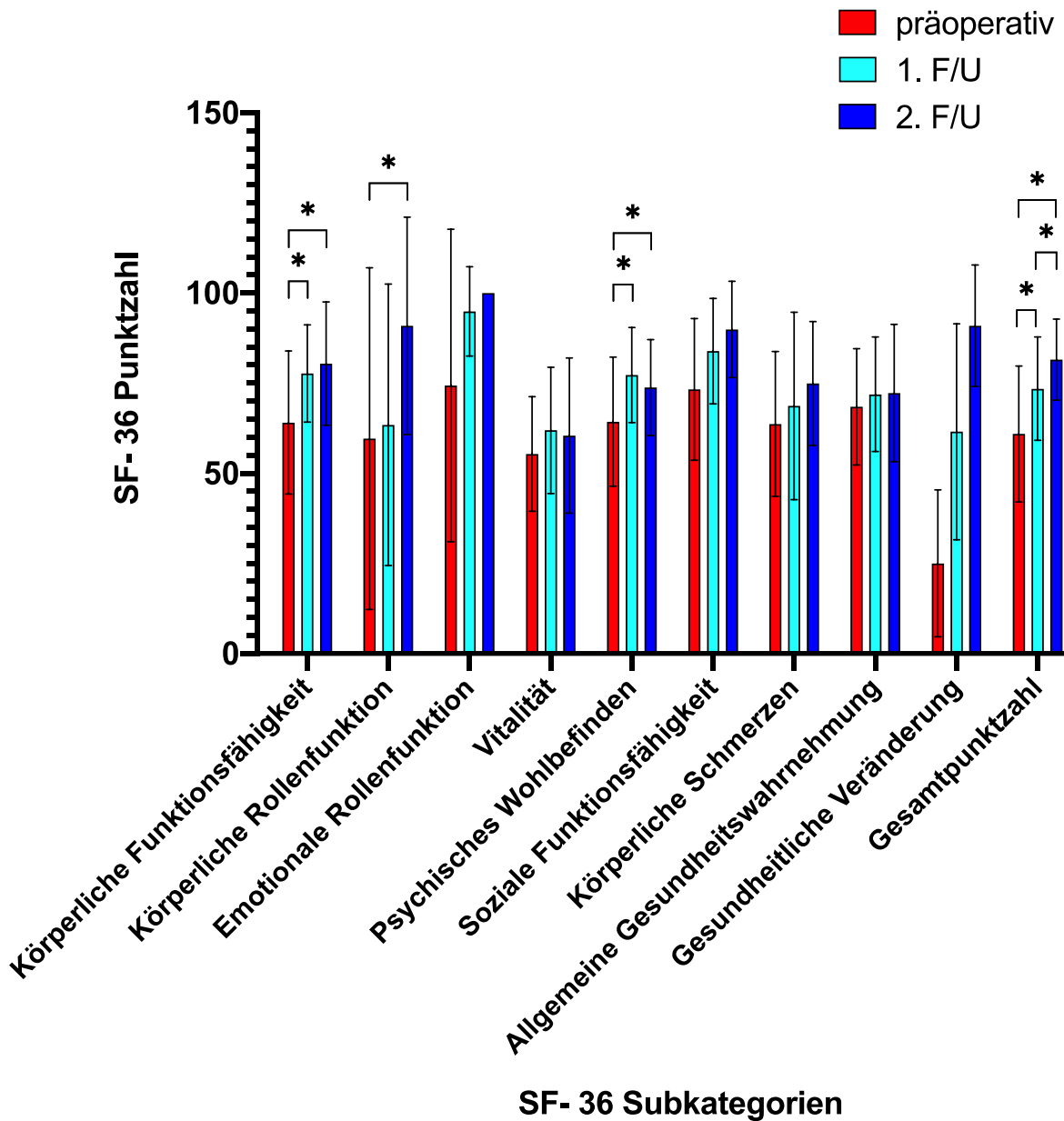


Abbildung 32: Auswertung des SF-36 Fragebogen inklusive Subkategorien präoperativ, im 1. F/U (6 Monate postoperativ) und im 2. F/U (12 Monate postoperativ)

3.3 Auswertung der gehaltenen Röntgenaufnahmen

Die postoperativen Aufnahmen wurden 10,1 ($\pm 7,8$) Monate nach der Operation angefertigt. Die durchschnittliche SSD der HSL reduzierte sich von 11,3 mm ($\pm 4,5$ mm) auf 6,1 mm ($\pm 2,4$ mm). Es wurde somit eine durchschnittliche Reduktion der SSD von 5,3 mm ($\pm 3,8$ mm; $p < 0,01$) erreicht.

3.4 Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Gesamtkohorte

3.4.1 Analyse der Gesamtkohorte bei 90° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Gesamtkohorte bei 90° Knieflexion ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 33):

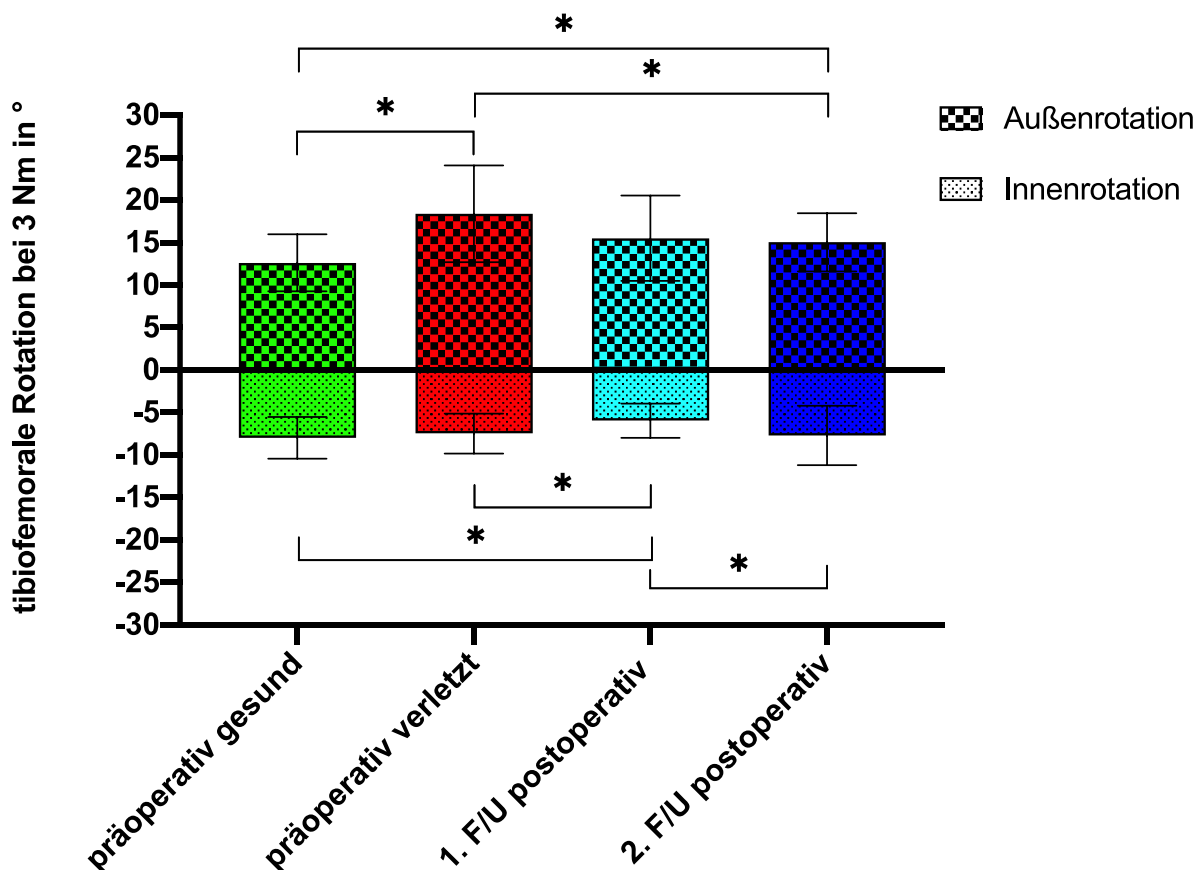


Abbildung 33: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 90° Knieflexion (1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

Es zeigte sich eine signifikant erhöhte Außenrotation des verletzten Kniegelenkes gegenüber der gesunden Gegenseite von durchschnittlich 5,8° ($p < 0,01$). Im 2. F/U zeigte sich eine signifikante Reduktion der Außenrotation im Vergleich zum präoperativen

Status um durchschnittlich $3,3^\circ$ ($p = 0,03$). Die Innenrotation zeigte sich im 1. F/U um $2,0^\circ$ signifikant reduziert im Vergleich zur gesunden Gegenseite ($p = 0,01$). Auch im Vergleich zum präoperativen Status zeigte sich die Innenrotation im 1. F/U um $1,5^\circ$ signifikant reduziert ($p = 0,04$). Die Innenrotation erreichte im 2. F/U wieder das Niveau der gesunden Gegenseite und des präoperativen Status.

3.4.1 Analyse der Gesamtkohorte bei 60° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Gesamtkohorte bei 60° Knieflexion ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 34):

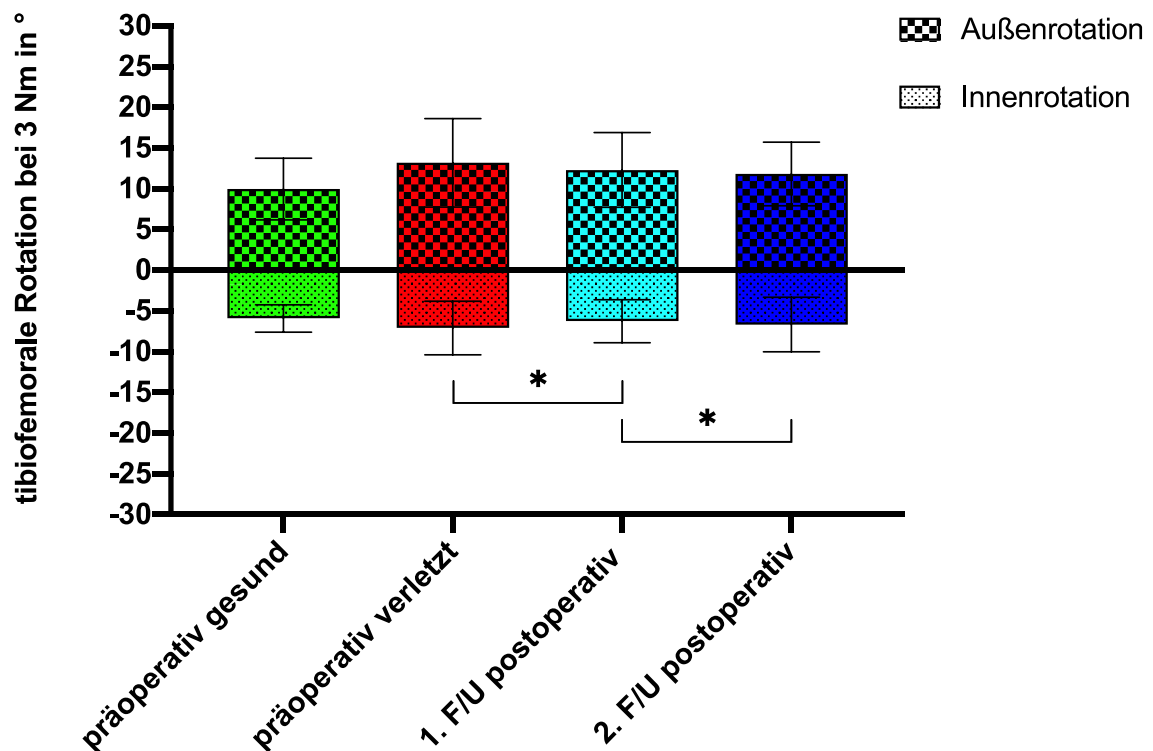


Abbildung 34: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 60° Knieflexion (1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

Es zeigte sich eine erhöhte Außenrotation des verletzten Kniegelenkes gegenüber der gesunden Gegenseite von durchschnittlich $3,2^\circ$, die jedoch nicht signifikant war ($p = 0,06$). Die Innenrotation zeigte sich im 1. F/U um $0,8^\circ$ signifikant reduziert im Vergleich zum präoperativen Status ($p = 0,04$), erreichte jedoch im 2. F/U wieder das Niveau des präoperativen Status.

3.4.3 Analyse der Gesamtkohorte bei 30° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Gesamtkohorte bei 30° Knieflexion ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 35):

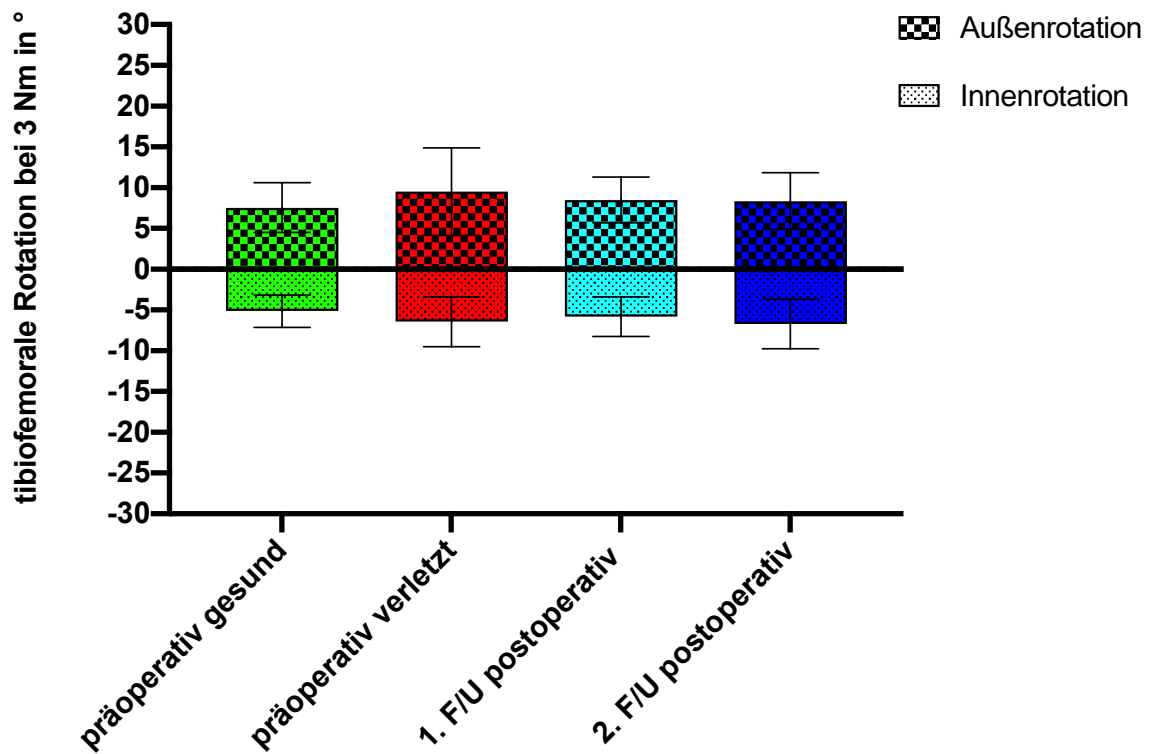


Abbildung 35: Tibiofemorale Rotation der Gesamtkohorte bei 3 Nm und bei 30° Knieflexion (1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

3.5 Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Subgruppen

Zur weiteren Analyse der tibiofemorale Rotationsstabilität wurde die untersuchte Gesamtkohorte in zwei Subgruppen aufgeteilt. Eine Subgruppe umfasste alle Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB ohne PLS erhalten haben. Die andere Subgruppe umfasste alle Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS erhalten haben.

3.5.1 Analyse der Subgruppen bei 90° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Subgruppen bei 90° Knieflexion ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 36):

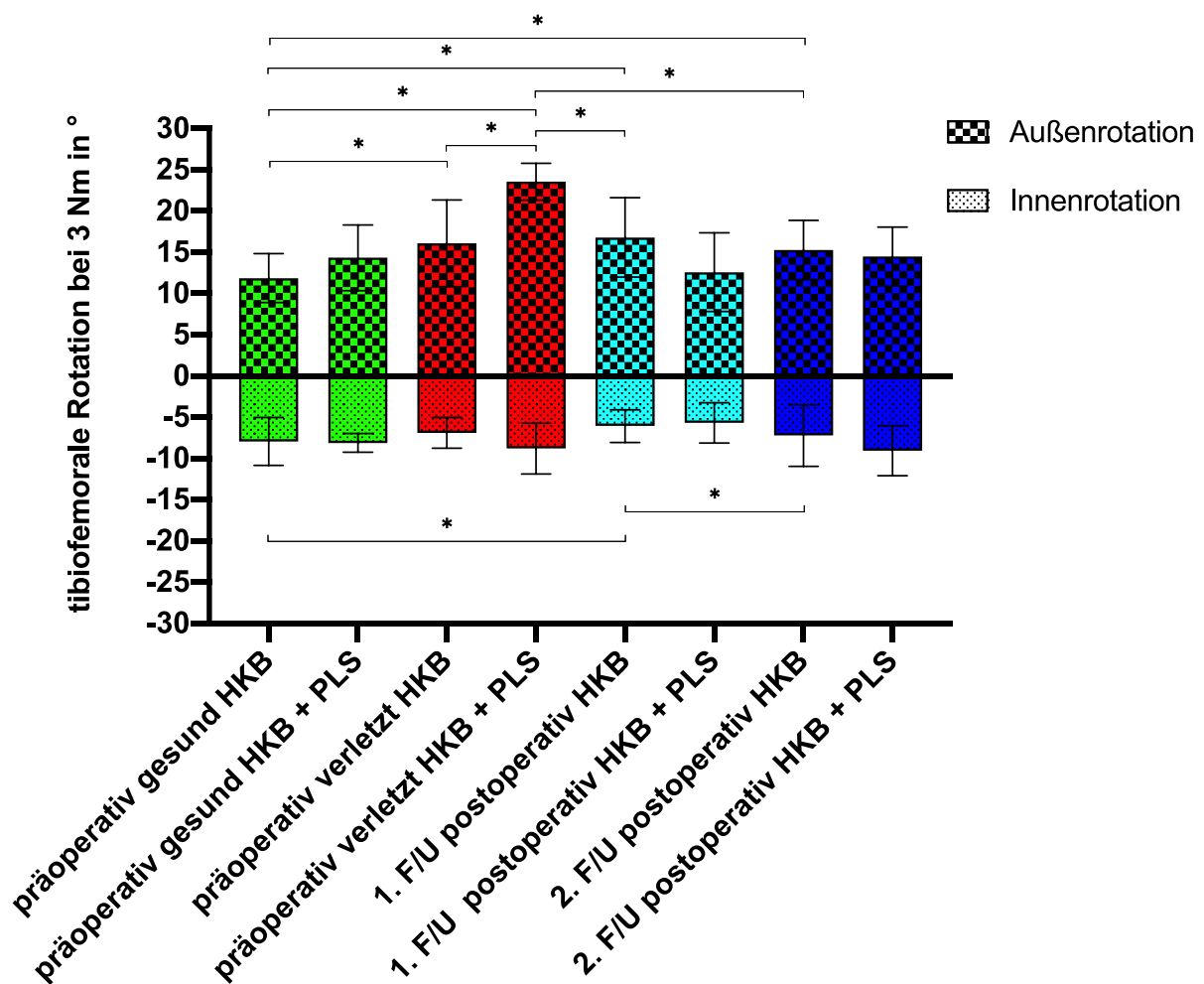


Abbildung 36: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 90° Knieflexion

(1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

In der Auswertung der tibiofemorale Rotation der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS zeigte sich eine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotation des verletzten Kniegelenkes gegenüber der gesunden Gegenseite von durchschnittlich $4,2^\circ$ ($p = 0,01$). Im 1. F/U zeigte sich die Außenrotation weiterhin signifikant um durchschnittlich $4,9^\circ$ erhöht im Vergleich zur gesunden Gegenseite ($p = 0,03$). Auch im 2. F/U zeigte sich die Außenrotation weiterhin signifikant um durchschnittlich $3,4^\circ$ erhöht im Vergleich zum gesunden Kniegelenk ($p = 0,01$). Die Innenrotation zeigte sich in dieser Subgruppe im 1. F/U um durchschnittlich $1,8^\circ$ signifikant reduziert im Vergleich zur gesunden Gegenseite ($p = 0,02$), erreichte aber im 2. F/U wieder das Niveau der gesunden Gegenseite.

Im präoperativen Vergleich der verletzten Kniegelenke der beiden Subgruppen zeigte die Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS gegenüber der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS eine signifikant höhere Außenrotation von $7,5^\circ$ ($p = 0,03$). Die Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS zeigte beim verletzten Kniegelenk im Vergleich mit der gesunden Gegenseite der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS präoperativ eine um durchschnittlich $11,7^\circ$ signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotation ($p < 0,01$).

3.5.2 Analyse der Subgruppen bei 60° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Subgruppen bei 60° Knieflexion ist in folgender Abbildung dargestellt (Abb. 37):

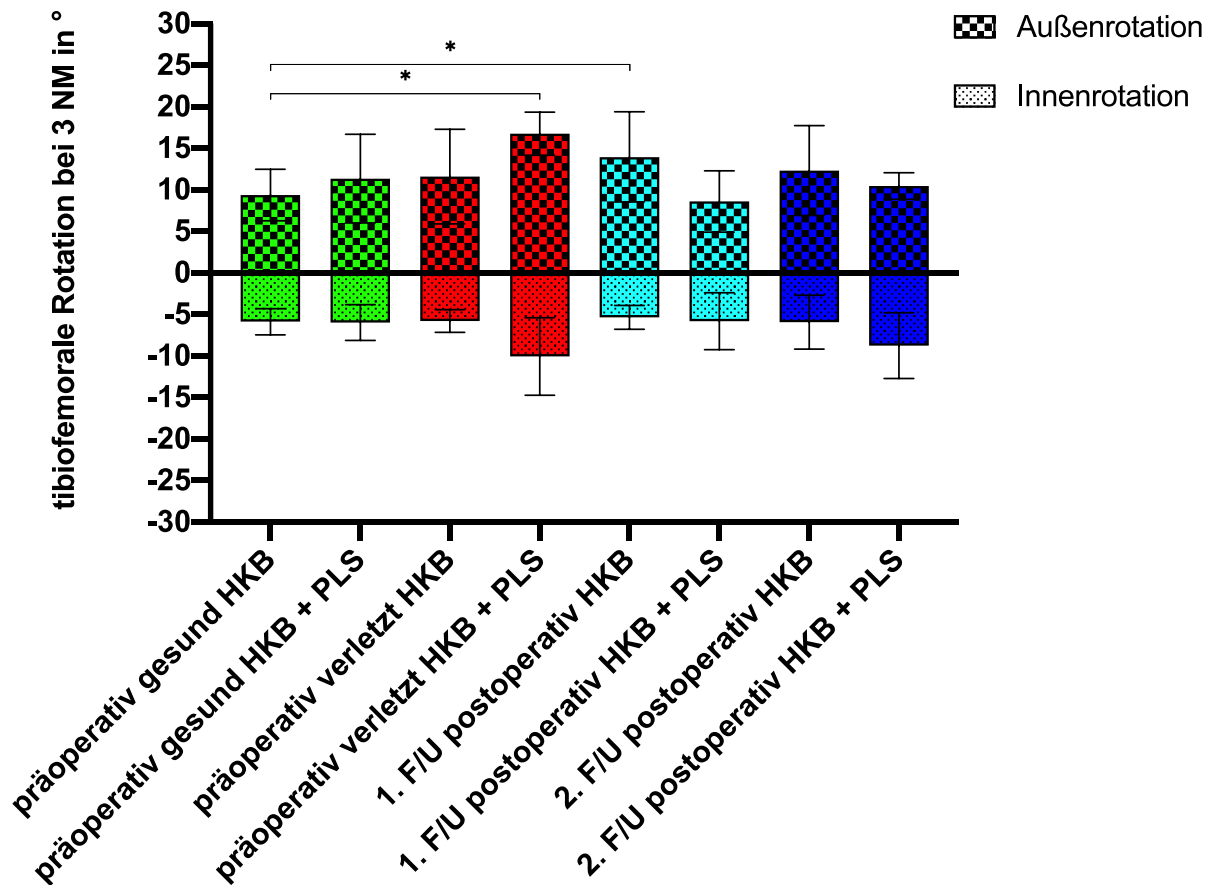


Abbildung 37: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 60° Knieflexion

(1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

In der Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS zeigte sich im 1. F/U eine signifikant erhöhte Außenrotation im Vergleich zur gesunden Gegenseite von durchschnittlich 4,6° ($p = 0,01$). Die Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS zeigte im Vergleich mit der gesunden Gegenseite der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS präoperativ eine um durchschnittlich 7,4° signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotation ($p = 0,01$).

3.5.3 Analyse der Subgruppen bei 30° Knieflexion

Die Auswertung der tibiofemorale Rotationsstabilität der Subgruppen bei 30° Knieflexion ist in folgender Abbildung dargestellt (Abb. 38):

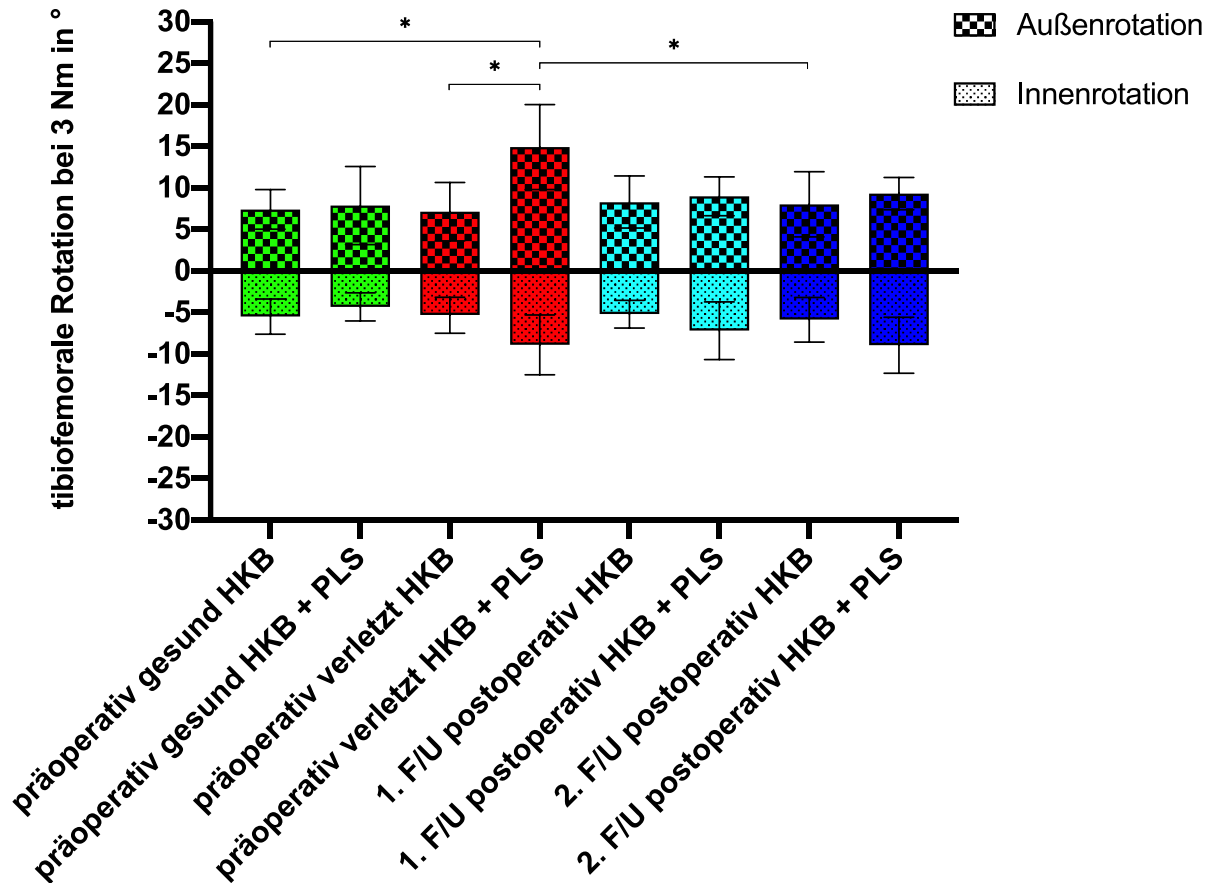


Abbildung 38: Tibiofemorale Rotation der Subgruppen: Probanden mit Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS (HKB + PLS) und Probanden mit Rekonstruktion des HKB ohne PLS (HKB) bei 3 Nm und bei 30° Knieflexion

(1. F/U = 1. Follow up 6 Monate postoperativ, 2. F/U = 2. Follow up 12 Monate postoperativ)

Im Vergleich der beiden Subgruppen zeigte präoperativ die Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS gegenüber der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS auf der verletzten Seite eine signifikant höhere Außenrotation von 7,8° ($p = 0,02$). Im Vergleich mit der gesunden Gegenseite der Subgruppe HKB-Rekonstruktion ohne PLS zeigte die Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS eine um durchschnittlich 7,5° signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotation ($p < 0,01$).

4 Diskussion

Bisherige Erkenntnisse der tibiofemorale Rotationsstabilität von HKB-insuffizienten Kniegelenken mit direkter Darstellung der Gelenkpartner fundieren größtenteils auf Kadaverstudien.^{8,30,38,44,62,64,75} Dabei wird die Komplexität dieser Verletzung nur modellhaft dargestellt und die gewonnenen Erkenntnisse können nur eingeschränkt auf den klinischen Alltag übertragen werden. In dieser prospektiv durchgeführten Studie war es erstmalig möglich die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten mit Rekonstruktion des HKB direkt, quantitativ und objektiv *in vivo* darzustellen und zu analysieren. Zur vollständigen Analyse der untersuchten Patientenkohorte wurden zusätzlich bewährte Parameter wie die subjektive Beurteilung durch Fragebögen und die Analyse der AP-Stabilität mittels gehaltener Röntgenaufnahmen erhoben.

4.1 Subjektive Beurteilung durch Fragebögen

4.1.1 IKDC 2000 – Formblatt zur subjektiven Beurteilung des Knies

Innerhalb des Beobachtungszeitraums erfolgte eine signifikante Zunahme des IKDC Scores von 56,6 Punkten ($\pm 16,6$) präoperativ auf 70,7 Punkte ($\pm 11,2$; $p = 0,02$) beim 2. F/U. Andere Studien zeigen vergleichbare postoperative Ergebnisse.

Lahner et al. berichten über einen durchschnittlichen IKDC Score von 65,1 Punkten in ihrer Analyse von 14 Patienten durchschnittlich 4 Jahre postoperativ nach isolierter HKB-Rekonstruktion.¹⁷³ Auch Hermans et al. verzeichnen einen IKDC Score von 65 Punkten in der Auswertung von 25 Patienten durchschnittlich 9 Jahre postoperativ nach isolierter HKB-Rekonstruktion.¹²⁷ Kim et al. zeigten einen durchschnittlichen IKDC Score von 64,5 Punkten bei 22 Patienten mit isolierter HKB-Rekonstruktion und einen durchschnittlichen IKDC Score von 72,1 Punkten bei 24 Patienten mit HKB-Rekonstruktion in Kombination mit einer PLS mindestens 24 Monate postoperativ.¹⁷⁴

Mygind-Klavsen et al. kamen in ihrer Analyse durchschnittlich 5,9 Jahre postoperativ auf einen IKDC Score von 64,8 Punkten bei 77 analysierten Patienten mit isolierter HKB-Rekonstruktion und auf einen IKDC Score von 65 Punkten bei 119 analysierten Patienten mit kombinierter Rekonstruktion des HKB.¹⁷⁵

Insgesamt lag der durchschnittliche postoperative IKDC Score der hier dargestellten Studie damit sogar leicht über den Werten der meisten anderen Studien. Auch wenn es innerhalb der Studie zu einer deutlichen Zunahme des IKDC Score im Studienverlauf gekommen ist und man dies in Anbetracht der Schwere der Knieverletzung als ein

zufriedenstellendes postoperatives Ergebnis werten kann, so weist ein durchschnittlicher postoperativer Wert von 70,7 Punkten jedoch auf noch bestehende Defizite in der Patientenzufriedenheit hin.

4.1.2 Lysholm Score

Der Lysholm Scores verbesserte sich von 65,2 Punkten ($\pm 20,1$) präoperativ auf 81,6 Punkte ($\pm 12,9$; $p = 0,06$) im 2. F/U. Andere Studien berichten über ähnliche postoperative Ergebnisse nach HKB-Rekonstruktion.

Hermanns et al. berichten von einem durchschnittlichen postoperativen Lysholm Score von 75 Punkten bei 25 Patienten durchschnittlich 9 Jahre postoperativ.¹²⁷ LaPrade et al. verzeichneten einen Zuwachs im Lysholm Score von präoperativ 48 Punkten auf 86 Punkte in der Analyse von 100 Patienten mit isolierter und kombinierter Rekonstruktion des HKB durchschnittlich 2,9 Jahre postoperativ.¹⁷⁶ Yang et al. konnten einen postoperativen Anstieg von 43 und 50 Punkten auf 88 und 90 Punkte in ihrer Analyse zweier Kohorten mit insgesamt 58 Patienten nach HKB-Einzelbündelrekonstruktion nachweisen.¹⁷⁷ In der Follow-up-Studie von 64 Patienten von Yoon et al. konnte ein postoperativer Lysholm Score von 74 Punkten verzeichnet werden.¹³¹

4.1.3 Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)

Im KOOS Score zeigte sich in der Gesamtpunktzahl ein signifikanter Anstieg von 65,4 Punkten präoperativ auf 75,4 Punkte postoperativ ($p = 0,04$). Somit bildet sich auch im KOOS Score eine Verbesserung der Kniegelenksgesundheit während des Studienverlaufs ab. In der Analyse der fünf Dimensionen des KOOS Score konnte ein Anstieg der Punktzahl in allen Dimensionen verzeichnet werden. In den Dimensionen Symptome, Schmerz und Alltagsaktivitäten war der Anstieg moderat, jedoch auf einem hohen Niveau. So konnte in der Kategorie Alltagsaktivitäten ein Score von 87,7 Punkten ($\pm 12,8$) im 2. F/U erreicht werden, welches man als ein gutes postoperatives Ergebnis deuten kann. In den Kategorien Sport und Lebensqualität konnte ein stärkerer Zuwachs verzeichnet werden, auch wenn dieser auf einem niedrigeren Niveau stattfand. So stieg die Punktzahl in der Kategorie Lebensqualität innerhalb des Studienverlaufs von präoperativ 26,4 Punkten ($\pm 14,0$) auf 50,6 Punkte ($\pm 19,9$) postoperativ ($p < 0,01$), welches einem Zuwachs von 91,6 % entspricht. Auch diese Daten zeigen somit eine Verbesserung der Kniegelenksgesundheit innerhalb des Studienverlaufs. Eine Punktzahl von 50,6 Punkten ($\pm 19,9$) in der Subkategorie Lebensqualität im 2. F/U spricht jedoch

auch dafür, dass die Lebensqualität durch die Kniegelenksverletzung zum Beobachtungszeitpunkt 12 Monate postoperativ weiterhin eingeschränkt war.

Andere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen. So zeigen Mygind-Klavsen et al. in ihrer Analyse von 172 Patienten mit kombinierter oder isolierter Rekonstruktion des HKB ein Jahr postoperativ ein fast identisches Bild mit den von uns erhobenen Daten bezüglich des KOOS Score.¹⁷⁵ Auch hier zeigt sich ein milder Anstieg auf hohem Niveau in den Dimensionen Symptome, Schmerz und Alltagsaktivitäten. In den Dimensionen Sport und Lebensqualität zeigt sich wie in den von uns erhobenen Daten ein deutlicherer Anstieg auf einem niedrigeren Niveau. Auch die absoluten Zahlen der Subkategorien sind fast identisch mit den von uns erhobenen Daten. Lien et al. kommen in ihrer Analyse von 43 Patienten mit isolierter HKB-Rekonstruktion durchschnittlich 48 Monate postoperativ ebenfalls zu ähnlichen Ergebnissen.¹⁷⁸

4.1.4. SF-36

In der Auswertung des allgemeinen Gesundheitszustandes durch den SF-36 Gesundheitsfragebogen konnte eine Steigerung in allen 8 Subkategorien während des Studienverlaufs verzeichnet werden. Die Gesamtpunktzahl steigerte sich von 60,9 Punkten ($\pm 18,8$) präoperativ auf 81,5 Punkte ($\pm 11,3$) im 2. F/U ($p < 0,01$). Dieses Ergebnis entspricht einem deutlich positiven Verlauf der subjektiven Einschätzung des eigenen allgemeinen Gesundheitszustandes durch die Patienten während des Studienverlaufs. Insbesondere die Subkategorie körperliche Rollenfunktion und die gesundheitliche Veränderung zeigten einen deutlichen Anstieg. So kann man daraus schließen, dass die untersuchten Patienten während des Studienverlaufs die Entwicklung ihrer allgemeinen körperlichen Leistungsfähigkeit und ihre gesundheitliche Veränderung als besonders positiv bewerteten. In anderen kniechirurgischen Studien wird der SF-36 selten verwendet, da er nicht die Kniegelenksgesundheit, sondern das allgemeine Gesundheitsempfinden abbildet. Aus diesem Grund fand er in dieser Studie jedoch ganz bewusst Verwendung, da so durch die ermittelten Ergebnisse gezeigt werden konnte, dass die untersuchten Patienten nicht nur in Bezug auf ihre Kniegelenksgesundheit ihren Verlauf während des Studienzeitraumes als positiv bewerteten, sondern auch in Bezug auf ihren allgemeinen Gesundheitszustand.

LaPrade et al. verwendeten in ihrer Studie mit 100 Patienten und isolierter oder kombinierter Rekonstruktion des HKB, welche im Durchschnitt 3 Jahre postoperativ untersucht worden sind, den SF-12, welcher eine Kurzform des SF-36 darstellt.¹⁷⁶ Die

Ergebnisse dieser Studie spiegeln nicht ganz die Ergebnisse unserer Studie wider. So kam es in der Studie von La Prade et al. auch zu einem Anstieg der Gesamtpunktzahl von 34,0 Punkten präoperativ auf 54,8 Punkte postoperativ. Der postoperative Wert mit durchschnittlich 54,8 Punkten lag somit deutlich unter den von uns im Durchschnitt erhobenen 81,5 Punkten. Ihle et al. kamen in ihrer postoperativen Analyse von 12 Patienten mit isolierter HKB-Rekonstruktion durchschnittlich 18,2 Monate postoperativ auf einen durchschnittlichen Wert von 80,4 Punkten im SF-36-Gesamtscore.¹⁷⁹ Dies entspricht den Ergebnissen unserer Daten.

4.2 AP-Stabilität

In der Analyse der durchgeführten gehaltenen Aufnahmen konnte eine signifikante Reduktion der posterioren Instabilität in der SSD von 11,3 mm (\pm 4,5 mm) präoperativ auf 6,1 mm (\pm 2,4 mm) postoperativ verzeichnet werden ($p < 0,01$). Somit konnte die durchschnittliche SSD der HSL in dem analysierten Patientenkollektiv um 46,4 % reduziert werden.

Yoon et al. berichten in ihrer Analyse von 28 Patienten mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB und 36 Patienten mit Doppelbündelrekonstruktion des HKB von ähnlichen Ergebnissen. So konnte in der Gruppe der Patienten mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB eine Reduktion der hinteren Schublade in der SSD von 10,3 mm (\pm 3,4 mm) auf 5,3 mm (\pm 3,5 mm) erreicht werden. In der Analyse der Patienten mit einer Doppelbündelrekonstruktion des HKB konnten Yoon et al. eine Reduktion von 9,8 mm (\pm 4,3 mm) präoperativ auf 5,0 mm (\pm 3,8 mm) postoperativ verzeichnen.¹³¹ Lahner et al. zeigten bei 14 Patienten mit erfolgter Einzelbündelrekonstruktion des HKB 4 Jahre postoperativ eine Reduktion der hinteren Schublade in der SSD von 10,0 mm (\pm 1,7 mm) präoperativ auf 4,6 mm (\pm 2,3 mm) postoperativ.¹⁷³ Zhang et al. beobachteten bei 18 Patienten mit erfolgter Einzelbündelrekonstruktion des HKB mit zusätzlicher Rekonstruktion des Ligamentum popliteofibulare eine Reduktion der hinteren Schublade von 17,3 mm (\pm 4,1 mm) präoperativ auf 4,6 mm (\pm 3,2 mm) postoperativ.⁸³

Lien et al. zeigten in ihrer Studie eine Reduktion der hinteren Schublade in der SSD von 12,3 mm (\pm 3,9 mm) präoperativ auf 8,4 mm (\pm 4,8 mm) postoperativ bei 43 Patienten mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB 4 Jahre postoperativ. Jedoch waren in dieser Studie nur von 16 Patienten präoperative gehaltene Aufnahmen verfügbar. Lee et al. verzeichneten eine Reduktion von 12,1 mm (\pm 2,5 mm) präoperativ auf

2,7 mm ($\pm 1,3$ mm) postoperativ bei 92 Patienten mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB sowie Patienten mit Einzelbündelrekonstruktion des HKB mit zusätzlicher PLS mindestens zwei Jahre postoperativ.¹⁵³ LaPrade et al. verzeichneten in ihrer Analyse von 100 Patienten mit erfolgter Doppelbündelrekonstruktion des HKB durchschnittlich 3 Jahre postoperativ eine Reduktion von 11,6 mm ($\pm 3,5$ mm) präoperativ auf 1,6 mm ($\pm 2,0$ mm) postoperativ.¹⁷⁶ Die erreichte Reduktion der HSL liegt in dieser Studie über den Ergebnissen der von uns analysierten Patienten und denen der anderen Studien. In der Analyse der Studie fällt auf, dass die Patienten mit der Kneeling View Technik und nicht mit dem Telos Halteapparat untersucht wurden. Jedoch konnte von Jung et al. gezeigt werden, dass die Kneeling View Technik vergleichbare Ergebnisse wie der Telos Halteapparat erzielt.¹⁵ In der Zusammenschau sind die Ergebnisse unserer Studie vergleichbar mit den Daten anderer Studien. Mit einer Reduktion der hinteren Schublade in der SSD um 46,4 % kann man durchaus von einem erfolgreichen operativen Resultat ausgehen. Jedoch zeigt eine absolute SSD von 6,1 mm ($\pm 2,4$ mm) postoperativ, dass eine geringe Restinstabilität im Vergleich zur Gegenseite postoperativ persistiert. Auch zeigten die Studien von LaPrade et al. und von Lee et al. eine deutlichere Reduktion in der SSD der hinteren Schublade als in der von uns analysierten Patientenkohorte und denen anderer Studien. Woher diese Unterschiede kommen lässt sich nur schwer ermitteln. Jedoch ist neben der operativen Therapie eine konsequente Nachbehandlung inklusiver einer Orthesentherapie durch den Patienten essentiell, um das operative Ergebnis während des Remodeling-Prozesses zu sichern.

4.3 Tibiofemorale Rotationsstabilität

4.3.1 Tibiofemorale Rotationsstabilität der analysierten Patientenkohorte

In der vorliegenden Studie konnte auf prospektive Weise erstmalig die passive tibiofemorale Rotationsstabilität in einem Patientenkollektiv mit HKB-Ruptur und anschließender kombinierter oder isolierter HKB-Rekonstruktion quantitativ, objektiv und durch die Darstellung der Gelenkpartner direkt bestimmt und analysiert werden. Dies erfolgte durch ein am Julius Wolff Institut entwickeltes und evaluiertes Verfahren mit einem angewendetem Drehmoment von 3 Nm bei einem Knieflexionswinkel von jeweils 90°, 60° und 30°.^{100,150,151} Die in dieser Studie erhobenen *in vivo* Daten lassen sich mit den Ergebnissen von ähnlich aufgebauten Kadaverstudien vergleichen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der modelhaften Kadaverstudien besteht jedoch der Unterschied, dass die Daten dieser Arbeit die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten aus der klinischen Praxis abbilden. Folglich kann man durch die von uns erhobenen Daten die Ergebnisse ähnlich aufgebauter Kadaverstudien besser in einen klinischen Zusammenhang bringen.

In der präoperativen Analyse der Gesamtkohorte zeigte sich bei 90° Knieflexion eine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden kontralateralen Seite. Zudem konnte präoperativ in der Gesamtkohorte bei 60° und 30° Knieflexion eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zum gesunden Kniegelenk beobachtet werden, welche jedoch nicht signifikant war. Somit konnte die von uns aufgestellte erste Hypothese in der untersuchten Patientenkohorte bei 90° Knieflexion bestätigt werden, musste jedoch für einen Knieflexionswinkel von 60° und 30° abgelehnt werden.

Da bei den Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS erhalten haben in der klinischen und intraoperativen Untersuchung die Diagnose einer PLRI gestellt wurde und somit klinisch eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität festgestellt wurde, erfolgte eine Subgruppenunterteilung in zwei Subgruppen. Die eine Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS erhalten haben. Die andere Subgruppe umfasste alle untersuchten Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB ohne PLS erhalten haben.

Die Patienten, welche eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben, zeigten präoperativ bei 90° Knieflexion eine in Bezug auf das gesamte Patientenkollektiv zwar

geringere, dennoch im Vergleich zur gesunden Gegenseite signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität. Dieses Ergebnis kann man dadurch erklären, dass das HKB den sekundärer Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation darstellt und bei 90° Knieflexion maximal gespannt ist.⁴⁶ Folglich kann eine Verletzung des HKB zu einer tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei 90° führen. Dieser Zusammenhang konnte schon in mehreren modelhaften Kadaverstudien gezeigt werden.

Girgis et al. beobachteten schon 1975 in ihrer Kadaverstudie nach isolierter Durchtrennung des HKB eine durchschnittlich erhöhte tibiofemorale Außenrotation von 8°. Jedoch wurde in dieser Studie das angewendete axiale Drehmoment nicht definiert und dieses nur als eine undefinierte, manuell angewendete Kraft beschrieben. Die von uns erhobenen Daten der Subgruppe von Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben, weisen im Vergleich mit der Studie von Girgis et al. eine höhere Außenrotationsstabilität auf, was man darauf zurückführen könnte, dass das angewendete axiale Drehmoment von Girgis et al. wahrscheinlich größer war als das von uns angewendete axiale Drehmoment. Übereinstimmend mit unseren Ergebnissen konnten Girgis et al. bei isolierter Durchtrennung des HKB eine geringere Außenrotationsstabilität nur bei gebeugtem Knie darstellen und nicht im gestreckten Kniegelenk.³⁰

Sekiya et al. kamen in ihrer Kadaverstudie nach isolierter Durchtrennung des HKB bei einem angewendeten Drehmoment von 5 Nm auf eine durchschnittlich erhöhte tibiofemorale Außenrotation von 6,7° im Vergleich zum intakten Kniegelenk. Diese *in vitro* Ergebnisse stimmen mit den von uns erhobenen *in vivo* Daten sehr gut überein. Auch die Tatsache, dass diese Differenz nur bei 90° Knieflexion zu verzeichnen war, spiegelt die Ergebnisse der von uns untersuchten Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben wider.⁸

Bae et al. konnten in ihrer Kadaverstudie nach Durchtrennung des HKB und einem angewendeten axialen Drehmoment von 6 Nm eine erhöhte tibiofemorale Außenrotation von durchschnittlich 8° zeigen. Auch diese Ergebnisse entsprechen den präoperativen Daten der von uns untersuchten Subgruppe, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben.⁶²

Kennedy et al. konnten in ihrer Kadaverstudie nach isolierter Durchtrennung des HKB ebenfalls eine geringere tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei allen Beugewinkeln ab 60° nachweisen. Jedoch ist die Differenz zum intakten Status trotz eines größeren angewendeten Drehmoments von 5 Nm nicht so ausgeprägt wie in der von uns

analysierten Subgruppe von Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben. Dies lässt im Vergleich darauf schließen, dass eventuell noch andere Strukturen in der von uns analysierten Patientenkohorte mitbetroffen waren oder dass der *in vivo* Status des Tibiofemoralgelenkes im Rahmen einer Verletzung des HKB zu einer erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität führt.⁷ Auch Wijdicks et al. kamen in ihrer Kadaverstudie mit einem ebenfalls angewendeten Drehmoment von 5 Nm zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie die Studie von Kennedy et al.⁶

Gill et al. untersuchten in ihrer Kadaverstudie die tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei isolierter Durchtrennung des HKB unter simulierten Kräften der ischiocruralen Muskulatur und des M. quadriceps femoris. Sie konnten unter diesen Bedingungen eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei 90° Knieflexion darstellen. Auch diese Ergebnisse stimmen mit den von uns erhobenen *in vivo* Daten überein, da auch wir präoperativ eine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten hatten, bei 90° Knieflexion aufzeigen konnten.⁶⁰

Es konnte jedoch nicht in allen biomechanischen Studien gezeigt werden, dass eine Verletzung des HKB ohne Beteiligung der posterolateralen Gelenkecke zu einer tibiofemorale Außenrotationsinstabilität führt. Apsingi et al. konnten in ihrer Kadaverstudie nach Durchtrennung des HKB keine geringere tibiofemorale Außenrotationsstabilität darstellen.²³ Kanega et al. konnten in ihrer Kadaverstudie keine oder eine nur sehr gering erhöhte tibiofemorale Außenrotation nach isolierter Durchtrennung des HKB und bei einem ebenfalls angewendeten axialen Drehmoment von 3 Nm nachweisen. Dennoch definierten sie das HKB in ihrer Studie als sekundären Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation, da nach der Durchtrennung der posterolateralen Gelenkecke die zusätzliche Durchtrennung des HKB zu einer deutlichen Abnahme der tibiofemorale Außenrotationsstabilität führte.⁵⁸

Auch Harner et al. konnten in ihrer Kadaverstudie keine erniedrigte tibiofemorale Außenrotationsstabilität nach isolierter Durchtrennung des HKB ermitteln. Allerdings definierten Harner et al. in ihrer Studie das HKB ebenfalls als sekundären Stabilisator der tibiofemorale Außenrotation. So konnten sie zeigen, dass nach Durchtrennung der posterolateralen Gelenkecke und bei einem axial angewendeten Drehmoment auf das Tibiofemoralgelenk die intern wirkenden Kräfte auf das HKB in der Außenrotation um 100 % gesteigert waren.⁶⁴

Petrigliano et al. konnten in ihrer Studie eine geringere tibiofemorale Außenrotationsstabilität nach Durchtrennung des HKB bei 90° Knieflexion verzeichnen. Diese Werte erreichten jedoch erreichten diese Werte keine statistische Signifikanz.⁵⁹

Moslemian et al. konnten innerhalb ihrer Kadaverstudie mit simulierten Muskelkräften bei einem angewendeten Drehmoment von 5 Nm eine um 1° signifikant erhöhte Außenrotationsinstabilität bei 45° Knieflexion nach Durchtrennung des HKB abbilden.¹⁸⁰ Dieses Ergebnis entspricht vom Ausmaß der tibiofemorale Außenrotationsinstabilität in Kombination mit dem angewendeten Drehmoment nicht den von uns erhobenen Daten, was darin begründet sein kann, dass die Probanden in unserem Versuchsaufbau womöglich eine geringere Muskelspannung aufwiesen. Weiterhin konnten Moslemian et al. in ihrer Studie im Gegensatz zu unserer Studie und zu der ähnlich aufgebauten Studie von Gill et al. keine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei 75° und 90° Knieflexion nachweisen.

Insgesamt weisen die von uns erhobenen Daten daraufhin, dass die Ergebnisse der Kadaverstudien, welche eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei isolierter Durchtrennung des HKB darstellen, eher dem klinischen Bild der von uns untersuchten Patienten mit einer diagnostizierten Ruptur des HKB ohne Beteiligung der posterolateralen Gelenkecke entsprechen.

Mit steigendem Ausmaß einer Verletzung des HKB geht man von einem Übergang einer isolierten Verletzung des HKB in eine Kombinationsverletzung mit Strukturen der posterolateralen Gelenkecke aus.⁹ Eine isolierte Verletzung des HKB von einer kombinierten Verletzung mit Strukturen der posterolateralen Gelenkecke abzugrenzen, stellt sich jedoch im klinischen Alltag als sehr schwierig dar. So gibt es derzeit im klinischen Alltag keine standardisierten, objektivierbaren Messmethoden, um eine Rotationsinstabilität der posterolateralen Gelenkecke zu diagnostizieren. Aufgrund dessen kann man für die erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität der untersuchten Subgruppe, die eine HKB-Rekonstruktion ohne PLS erhalten haben, eine vermeintliche Schädigung der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke, die zusätzlich zur Schädigung des HKB zu einer erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität führt, nicht gänzlich ausschließen.

Die Patienten, welche eine HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS erhalten haben, zeigten präoperativ erwartungsgemäß in den von uns erhobenen Daten eine deutlich erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden kontralateralen Seite in allen Knieflexionswinkeln.

Noyes et al. konnten in ihrer Kadaverstudie darstellen, dass die Durchtrennung der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke zu einer erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität führt. In ihrer Studie wurde an Kadavern der unteren Extremitäten vor und nach sequentieller Durchtrennung der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke und des hinteren Kreuzbandes der Dial-Test durchgeführt. Sie ermittelten bei 30° Knieflexion und einem angewendeten Drehmoment von 5 Nm eine Zunahme der tibiofemorale Außenrotation von durchschnittlich 18° im Vergleich zum intakten Status.⁶¹ In Übereinstimmung mit diesen Daten, zeigte auch in unserer Analyse die Subgruppe der Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion mit PLS erhalten haben bei 30° Knieflexion präoperativ eine vermehrte tibiofemorale Außenrotation von durchschnittlich 7,0° bei einem angewendeten Drehmoment von 3 Nm. Bei einem Knieflexionswinkel von 90° kamen Noyes et al. auf eine vermehrte tibiofemorale Außenrotation von 15,1°. Auch hier konnten wir präoperativ bei 90° Knieflexion bei den Patienten, die eine HKB-Rekonstruktion mit PLS erhalten haben, eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität von durchschnittlich 9,3° im Vergleich zur gesunden Gegenseite nachweisen.

In einer weiteren Kadaverstudie ermittelten Wiley et al. nach Durchtrennung des HKB und Strukturen der posterolateralen Gelenkecke eine vermehrte tibiofemorale Außenrotation von ca. 3° bei 30° Knieflexion und ca. 10° bei 90° Knieflexion im Vergleich zum intakten Status bei einem angewendeten Drehmoment von ebenfalls 3 Nm.¹²² Diese *in vitro* Werte bei 90° Knieflexion entsprechen den präoperativen Werten, die wir in der Subgruppe HKB-Rekonstruktion in Kombination mit PLS erhoben haben. Die von uns erhobenen Werte bei 30° Knieflexion zeigen jedoch in dieser Subgruppe eine höhere Außenrotationsinstabilität als in der Studie von Wiley et al. Dies kann man darauf zurückführen, dass in der Kadaverstudie von Wiley et al. das LCL weiterhin intakt war und lässt vermuten, dass das LCL in der untersuchten Subgruppe zumindest mitbetroffen war.

In der postoperativen Analyse zeigte die Gesamtkohorte im 1. F/U in allen Knieflexionswinkeln eine leicht erhöhte Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden kontralateralen Seite, welche jedoch nicht signifikant war. Somit konnte die zweite aufgestellte Hypothese in der untersuchten Patientenkohorte für alle Knieflexionswinkel bestätigt werden. Im 2. F/U zeigte sich in der Gesamtkohorte bei 90° Knieflexion eine signifikant höhere tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des rekonstruierten Kniegelenkes im Vergleich zum gesunden

kontralateralen Kniegelenk. Bei 60° und 30° Knieflexion zeigte sich in der Gesamtkohorte eine leicht erhöhte Außenrotationsinstabilität des rekonstruierten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden kontralateralen Seite, welche nicht signifikant war. Demnach konnte die dritte aufgestellte Hypothese für die Knieflexionswinkel 30° und 60° bestätigt werden, musste jedoch für einen Knieflexionswinkel von 90° abgelehnt werden.

Die Analyse der Subgruppen gibt hier weiteren Aufschluss. In der Analyse der tibiofemorale Rotationsstabilität beim 1.F/U und 2. F/U konnte gezeigt werden, dass in dem von uns untersuchten Patientenkollektiv die Einzelbündelrekonstruktion des HKB ohne PLS keinen Einfluss auf die präoperativ leicht erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei 90° Knieflexion hatte. Damit bestätigen unsere Daten die Ergebnisse von Kadaverstudien, welche ebenfalls keine Auswirkung einer Einzelbündelrekonstruktion des HKB auf die tibiofemorale Rotationsstabilität nachweisen konnten. So konnten Kennedy et al. in ihrer Kadaverstudie keine Veränderung der tibiofemorale Rotationsstabilität nach Rekonstruktion des HKB in Einzelbündeltechnik verzeichnen.⁷ Auch Wijdicks et al. konnten in ihrer Kadaverstudie keinen Einfluss der Einzelbündelrekonstruktion auf die tibiofemorale Rotationsstabilität beobachten.⁶

Darüber hinaus konnte in Kadaverstudien ebenso gezeigt werden, dass auch die Doppelbündelrekonstruktion des HKB eine erhöhte Außenrotationsinstabilität nicht wiederherstellen kann und im Vergleich mit der Einzelbündelrekonstruktion des HKB keine Vorteile in Bezug auf die Wiederherstellung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität hat.^{6,8,23,122}

In der analysierten Subgruppe der Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS erhalten haben, konnte postoperativ eine Reduktion der erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität in allen Knieflexionswinkeln verzeichnet werden. Insgesamt konnte im Durchschnitt mindestens das Niveau der gesunden Gegenseite erreicht werden. Im 1. F/U konnte innerhalb dieser Subgruppe bei 90° und 60° Knieflexion im Durchschnitt sogar eine leicht erhöhte tibiofemorale Außenrotationsstabilität im Vergleich zur gesunden Gegenseite beobachtet werden, welche sich im 2. F/U den Werten der gesunden Gegenseite anglich.

Unsere Ergebnisse spiegeln diesbezüglich die Ergebnisse von biomechanischen Kadaverstudien wider. Krudwig et al. konnten in ihrer biomechanischen Analyse an zehn Kadavern zeigen, dass nach kombinierter Durchtrennung des HKB und der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke, die tibiofemorale Außenrotationsstabilität durch eine Einzelbündelrekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS in der nach Strobel

modifizierten Larson Technik wiederhergestellt werden kann. Sie konnten in der tibiofemorale Außenrotationsstabilität keinen Unterschied zwischen den rekonstruierten Kadavern und dem Status mit intaktem HKB und intakten Strukturen der posterolateralen Gelenkecke verzeichnen.⁷⁵

Apsingi et al. untersuchten in ihrer Studie anhand von zwölf Kadavern ebenfalls die Wiederherstellung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität durch die Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS in nach Strobel modifizierter Larson Technik. Auch sie konnten eine vollständige Wiederherstellung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität auf das Niveau des intakten Status beobachten. Darüber hinaus konnten sie keine Unterschiede zwischen der Einzelbündelrekonstruktion und der Doppelbündelrekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS in modifizierter Larson Technik feststellen.⁷⁷

In einer weiteren Kadaverstudie verglichen Apsingi et al. die isometrische PLS in modifizierter Larson Technik mit einer anatomischen Rekonstruktion der posterolateralen Gelenkecke. Auch in dieser Studie konnte die vollständige Wiederherstellung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität durch eine isometrische PLS in modifizierter Larson Technik erreicht werden.¹⁸¹

Miyatake et al. konnten wiederum in ihrer Kadaverstudie mit der PLS in der modifizierten Larson Technik nicht das Niveau der tibiofemorale Außenrotationsstabilität des intakten Status erreichen. Diese Ergebnisse stimmen nicht mit den Ergebnissen unserer *in vivo* Studie überein.¹⁸²

Auch klinische Studien, welche die tibiofemorale Außenrotationsstabilität nach Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS mit einem manuellen Test untersuchten, zeigen übereinstimmende Ergebnisse im Vergleich mit unseren Daten.

Zorzi et al. verzeichneten in ihrer klinischen Studie eine Wiederherstellung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei 17 von 19 untersuchten Patienten, welche ebenfalls eine kombinierte Einzelbündelrekonstruktion des HKB mit einer PLS in der modifizierten Larson Technik erhalten hatten. Die Untersuchung wurde mit dem Dial-Test durchgeführt und erfolgte im Durchschnitt 38 Monate nach der Operation.²⁴

Fanelli et al. untersuchten in ihrer Studie 41 Patienten, die eine kombinierte HKB-Rekonstruktion mit einer PLS erhalten hatten, in einem postoperativen Zeitraum von 2 - 10 Jahren mit dem Dial-Test. 40 Patienten (98 %) erreichten mindestens das Niveau der gesunden Gegenseite. Davon wiesen 29 Patienten (71 %) sogar eine erhöhte tibiofemorale Rotationsstabilität im Vergleich zur gesunden Gegenseite auf. Jedoch

wurde in dieser Studie die PLS mit einer Bicepstenodese und nicht wie in unserer Studie mit einer modifizierten Larson-Technik durchgeführt.⁸⁹

Kim et al. untersuchten in ihrer Studie 24 Patienten mit kombinierter Einzelbündelrekonstruktion des HKB und anatomischer Rekonstruktion der posterolateralen Gelenkecke. Sie verzeichneten 2 - 4 Jahre postoperativ eine Reduktion der tibiofemorale Außenrotationsinstabilität im Dial-Test von 11,6° bei 30° Knieflexion und 9,8° bei 90° Knieflexion im Vergleich zum präoperativen Status.¹⁷⁴

4.3.2 Diagnostik der tibiofemorale Außenrotationsinstabilität

In der Zusammenschau der erhobenen Daten und der aktuellen Studienlage kann man davon ausgehen, dass eine tibiofemorale Außenrotationsinstabilität durch eine PLS wiederhergestellt werden kann. Somit ist es umso wichtiger eine tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei Patienten mit einer Ruptur des HKB korrekt zu diagnostizieren, möglichst präzise zu quantifizieren und folglich in der Therapie richtig zu adressieren. Im derzeitigen klinischen Alltag wird eine tibiofemorale Außenrotationsinstabilität entweder durch untersucherabhängige klinische Tests, wie den Dial-Test, durch eine intraoperativ vermehrte Aufklappbarkeit des lateralen Kompartiments oder indirekt durch eine vergrößerte hintere Schublade von größer als 12 mm SSD in der Stressradiographie diagnostiziert.^{4,20,38} Diese unpräzise Vorgehensweise wurde schon mehrfach kritisiert. So vermuten Strobel et al., dass an den Klassengrenzen der subjektiven Einteilung einer intraoperativen vermehrten Aufklappbarkeit des lateralen Kompartiments bis zu 50 % falsch sind.²⁷ Hinzukommend kritisieren Strobel et al., „dass es nach wie vor große Probleme bereitet das Ausmaß der Außenrotation quantitativ zu erfassen“.²⁶ Dabei ist die korrekte Diagnose einer erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität in Kombination mit einer HKB-Ruptur mitentscheidend für den Therapieerfolg. So konnten Harner et al. in ihrer Kadaverstudie sehr gut darlegen, dass eine erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität zu einer deutlichen Mehrbelastung des rekonstruierten HKB führt und damit eine potentielle Ursache für ein Transplantatversagen darstellt.⁶⁴ Auch Markolf et al. kamen in ihrer biomechanischen Evaluation an 15 Kadaverknien zu dem Ergebnis, dass bei einer erhöhten tibiofemorale Außenrotationsinstabilität eine PLS das rekonstruierte HKB entlastet.⁶³ Zu der gleichen Schlussfolgerung kamen auch Mauro et al. in ihrer Kadaverstudie, in der sie zusätzlich die in-situ-Kräfte des AM- und des PL-Bündels gemessen haben.¹⁸³ Wir haben in dieser Studie erstmalig die tibiofemorale

Rotationsstabilität in einem Patientenkollektiv mit HKB-Ruptur und anschließender kombinierter oder isolierter HKB-Rekonstruktion quantitativ, objektiv und durch die Darstellung der Gelenkpartner direkt bestimmt und analysiert. Auf diese Weise konnten wir zeigen, dass in dem von uns untersuchten Patientenkollektiv präoperativ eine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität bei 90° Knieflexion im Vergleich zur gesunden Gegenseite vorlag. Weiterhin konnte bei den Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB mit PLS erhalten haben, eine postoperative Reduktion, der präoperativ erhöhten tibiofemoralen Außenrotationsinstabilität auf das Niveau der gesunden Gegenseite beobachtet werden.

Die genaue Diagnostik der vermehrten tibiofemoralen Außenrotationsinstabilität nimmt in der von uns untersuchten Patientenkohorte somit eine wichtige Rolle ein. Eine Methode, die die tibiofemorale Rotationsstabilität direkt, objektiv und quantitativ bestimmt, erscheint demzufolge als sinnvoll in der Diagnostik von Patienten mit einer Verletzung des HKB, um eine tibiofemorale Außenrotationsinstabilität zu diagnostizieren, zu quantifizieren und davon ausgehend die optimale Therapiestrategie zu wählen. So haben sich die gehaltenen Röntgenaufnahmen zum Goldstandard in der Quantifizierung der tibiofemoralen AP-Stabilität bei Patienten mit diagnostizierter HKB-Ruptur entwickelt.¹⁵ Eine objektive Methode zur Quantifizierung der tibiofemoralen Rotationsstabilität wird derzeit im klinischen Alltag jedoch nicht angewendet. Pacheco et al. wiesen in ihrer retrospektiven Analyse nach, dass in der von ihnen untersuchten Patientenkohorte mit Verletzung der posterolateralen Gelenkecke in 72 % der Fälle eine Schädigung der Strukturen der posterolateralen Gelenkecke und die damit einhergehende tibiofemorale Außenrotationsinstabilität am Tag des Erstkontaktes nicht korrekt diagnostiziert wurde.¹⁸⁴

Der Anteil ist erstaunlich hoch und zeigt exemplarisch, dass die korrekte Diagnosestellung einer tibiofemoralen Außenrotationsinstabilität oft verfehlt wird.

Eine standardisierte Methode zur direkten, objektiven Analyse der tibiofemoralen Rotationsstabilität könnte somit dazu beitragen, dass eine Verletzung der posterolateralen Gelenkecke, welche häufig in Kombination mit einer Verletzung des HKB vorkommt, zuverlässiger diagnostiziert werden könnte. Des Weiteren kann durch eine direkte, standardisierte Quantifizierung der tibiofemoralen Außenrotationsstabilität eine exakte SSD ermittelt und deren klinische Auswirkungen untersucht werden. Bisher wird ein mehr als 10° positiver Dial-Test im Seitenvergleich bei 90° und/oder 30° Knieflexion als positiv bewertet und führt bei Patienten mit Indikation zur Rekonstruktion des HKB zur Indikation einer zusätzlichen PLS.^{20,62,73,84,87,88} Die von uns untersuchte

Subgruppe von Patienten, die eine Rekonstruktion des HKB ohne PLS erhalten hat, wies jedoch bei 90° Knieflexion auch eine durchschnittlich erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität von 4,2° im Vergleich zur gesunden Gegenseite auf. Diese SSD konnte in unserer Studie nicht durch die Einzelbündelrekonstruktion des HKB korrigiert werden. Ob eine derartige, geringe und dennoch signifikante SSD eine Auswirkung auf das klinische Outcome hat, kann derzeit nicht gesagt werden, da hierzu aktuell die Evidenz fehlt. In diesem Bereich sollte man jedoch die Indikationsstellung der zusätzlichen PLS bei einer Rekonstruktion des HKB zunächst weiterhin kritisch sehen. Eine PLS kann nach der aktuellen Studienlage die tibiofemorale Außenrotationsstabilität wiederherstellen und ein HKB-Transplantat entlasten. Dennoch ist sie mit einer längeren Operationszeit und einem erhöhten perioperativen Komplikationsrisiko, wie zum Beispiel der Schädigung des Nervus peroneus verbunden. Maheshwer et al. berichten in ihrem systematischem Review von einer mittleren postoperativen Komplikationsrate von 20 % nach durchgeführter PLS.¹⁸⁵ Zusätzlich wird zur Durchführung einer PLS weiteres Transplantatmaterial benötigt. Auch die Möglichkeit eines möglichen Overconstraint durch eine PLS sollte beachtet werden, da es dadurch zu einer dauerhaften Mehrbelastung etwaiger Gelenkanteile kommen könnte. So zeigten die von uns untersuchten Probanden mit einer Rekonstruktion des HKB in Kombination mit einer PLS postoperativ sowohl bei 90° als auch 60° Knieflexion im 1. F/U eine Tendenz zur leicht erhöhten tibiofemoralen Außenrotationsstabilität im Vergleich zur gesunden Gegenseite. In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass Kim et al. in ihrer klinischen Studie zeigen konnten, dass eine beidseitig physiologisch erhöhte tibiofemorale Außenrotationslaxizität keinerlei Auswirkungen auf das Outcome nach einer PLS hatte.¹⁸⁶ Mit einer objektiven, direkten Methode zur Quantifizierung der tibiofemoralen Außenrotationsstabilität wäre es möglich eine klare Definition für die Indikationsstellung einer zusätzlichen PLS bei geplanter HKB-Rekonstruktion zu ermitteln. Die in dieser Studie verwendete Methodik eignet sich in der angewendeten Form aufgrund des hohen zeitlichen, technischen und personellen Aufwandes nicht zur Implementierung in den klinischen Alltag. Dennoch konnten wir Teilabschnitte der Methodik automatisieren. So lief die Segmentierung der MRT-Daten sowie die 2D zu 3D Registrierung der Bilddaten weitestgehend automatisch ab. Die weitere Forschungsarbeit sollte sich darauf konzentrieren die Abläufe einer derartigen Messmethode weiter zu automatisieren, um eine Implementierung in den klinischen Alltag zu ermöglichen. Somit könnte man mit den auf diese Weise erhobenen Daten ermitteln, welche Patienten von einer zusätzlichen

PLS bei einer Rekonstruktion des HKB profitieren und davon ausgehende Behandlungsalgorithmen definieren.

4.4 Limitationen der Arbeit

Es gibt mehrere Limitationen der vorliegenden Arbeit. Die relativ geringe Patientenzahl ist dadurch zu begründen, dass die Ruptur des HKB eine seltene Verletzung des Kniegelenkes darstellt und in vielen Fällen erfolgreich konservativ behandelt werden kann. Die Zahl der untersuchten Kniegelenke ist jedoch mit anderen klinischen Untersuchungen und Kadaverstudien vergleichbar.^{6,7,23,48,58,182,187}

Das angewandte Drehmoment von 3 Nm ist kleiner als in vielen *in vitro* Studien, wurde jedoch bewusst gewählt, da es von mehreren Autoren zur Ermittlung der tibiofemorale Rotationsstabilität verwendet wurde und im postoperativen Verlauf eine schonende Testung der tibiofemorale Rotationsstabilität, entsprechend der Kraftaufwendung beim Dial-Test erlaubt.^{58,101,151,164,188}

Alle Patienten wurden immer vom gleichen Operateur untersucht. Auch wenn dies standardisiert durchgeführt wurde, so wurde innerhalb dieser Studie die manuelle klinische Untersuchung und die intraoperative Beurteilung der lateralen Aufklappbarkeit des Tibiofemoralgelenkes nicht methodisch erfasst.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie konnte die passive tibiofemorale Rotationsstabilität von Patienten mit Rekonstruktion des HKB erstmalig auf prospektive Weise direkt, quantitativ und objektiv *in vivo* dargestellt und analysiert werden. Die analysierten Patienten mit kombinierter und isolierter Rekonstruktion des HKB zeigten präoperativ bei 90° Knieflexion und einem angewendeten Drehmoment von 3 Nm eine signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden Gegenseite von durchschnittlich 5,8° ($p < 0,01$). Im 2. F/U durchschnittlich 12 Monate postoperativ zeigte sich bei 90° Knieflexion eine signifikante Reduktion der Außenrotationsinstabilität im Vergleich zum präoperativen Status um durchschnittlich 3,3° ($p = 0,03$). In der Analyse der Subgruppe der Patienten mit HKB-Rekonstruktion in Kombination mit einer PLS zeigte sich präoperativ die tibiofemorale Außenrotationsinstabilität im Vergleich zur gesunden Gegenseite bei 90° Knieflexion um durchschnittlich 9,2° ($p = 0,12$) erhöht. Nach erfolgter Rekonstruktion des HKB mit PLS konnte eine Reduktion der Außenrotationsinstabilität sowohl bei 90°, 60° und 30° Knieflexion beobachtet werden und erreichte im arithmetischen Mittel das Niveau der gesunden Gegenseite. In der Analyse der Subgruppe der Patienten mit HKB-Rekonstruktion ohne PLS zeigte sich präoperativ bei 90° Knieflexion eine geringe, dennoch signifikant erhöhte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität des verletzten Kniegelenkes im Vergleich zur gesunden Gegenseite von 4,2° ($p = 0,01$). Nach erfolgter Rekonstruktion des HKB ohne PLS zeigte sich postoperativ keine Reduktion der erhöhten Außenrotationsinstabilität auf das Niveau der gesunden Gegenseite. In der Analyse der AP-Stabilität zeigte sich eine signifikante Reduktion der HSL von durchschnittlich 11,3 mm ($\pm 4,5$ mm) präoperativ auf durchschnittlich 6,1 mm ($\pm 2,4$ mm) postoperativ ($p < 0,01$). In der subjektiven Beurteilung konnte während des Studienzeitraumes eine stetige Verbesserung der Kniegelenksgesundheit in allen erhobenen Scores (IKDC 2000, KOOS, Lysholm score) beobachtet werden. Auch das allgemeine Gesundheitsempfinden, abgebildet mit der Gesamtpunktzahl des SF-36, steigerte sich signifikant von 59,9 Punkten ($\pm 18,3$) präoperativ auf 81,5 Punkte ($\pm 11,3$) im 2. F/U ($p < 0,01$). Insgesamt unterstützen die Daten dieser Studie die Annahme, dass Patienten mit Indikation zur Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes nicht nur eine erhöhte AP-Instabilität, sondern in der Mehrzahl auch eine vermehrte tibiofemorale Außenrotationsinstabilität aufweisen.

Damit verdeutlicht die Studie die große Bedeutung der präoperativen Beurteilung der tibiofemorale Außenrotationsstabilität bei Patienten mit Indikation zur Rekonstruktion des HKB. Ein standardisiertes, objektives und in der klinischen Anwendung nutzbares instrumentelles Messverfahren zur direkten Bestimmung der tibiofemorale Rotationsstabilität kann somit eine sinnvolle Ergänzung der klinischen Diagnostik sein und zur Therapieentscheidung beitragen. Die Entwicklung eines derartigen Messverfahrens sollte Gegenstand der zukünftigen Forschungsarbeit sein, da man somit bedeutend zur Therapieentscheidung beitragen kann und standardisierte, objektive Messkriterien zur Indikationsstellung einer kombinierten Versorgung mittels PLS etablieren kann.

6 Anhang

6.1 Literaturverzeichnis

1. Sanders TL, Pareek A, Barrett IJ, Hilal ., Kremers M, Bryan AJ, Stuart MJ, Levy BA, Krych AJ. Incidence and long-term follow-up of isolated posterior cruciate ligament tears. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2017;25 (10):3017–3023.
2. Strobel MJ, Weiler A, Schulz MS, Russe K, Eichhorn HJ. Arthroscopic evaluation of articular cartilage lesions in posterior cruciate ligament - Deficient knees. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2003;19(3):262–268.
3. Kambhampati SBS, Vaishya R. Publication trends of PCL in the last 40 years on PubMed. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2020;11(3):S354–S361.
4. Winkler PW, Zsidai B, Wagala NN, Hughes JD, Horvath A, Senorski EH, Samuelsson K, Musahl V. Evolving evidence in the treatment of primary and recurrent posterior cruciate ligament injuries, part 1: anatomy, biomechanics and diagnostics. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2021;29(3):672–681.
5. Harner CD, Höher J. Evaluation and Treatment of Posterior Cruciate Ligament Injuries. *The American Journal of Sports Medicine*. 1998;26(3):471–482.
6. Wijdicks CA, Kennedy NI, Goldsmith MT, Devitt BM, Michalski MP, Årøen A, Engebretsen L, Laprade RF. Kinematic analysis of the posterior cruciate ligament, Part 2: A comparison of anatomic single- Versus double-bundle reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*. 2013;41(12):2839–2848.
7. Kennedy NI, Laprade RF, Goldsmith MT, Faucett SC, Rasmussen MT, Coatney GA, Engebretsen L, Wijdicks CA. Posterior cruciate ligament graft fixation angles, part 1: Biomechanical evaluation for anatomic single-bundle reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*. 2014;42(10):2338–2345.
8. Sekiya J Haemmerle M Stabile K Vogrin T Harner C. Biomechanical Analysis of a Combined Double-Bundle Posterior Cruciate Ligament and Posterolateral Corner Reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*. 2005;33(3):360–369.
9. Sekiya JK, Whiddon DR, Zehms CT, Miller MD. A clinically relevant assessment of posterior cruciate ligament and posterolateral corner injuries: Evaluation of isolated and combined deficiency. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2008;90(8):1621–1627.
10. Fanelli GC. Posterior cruciate ligament injuries in trauma patients. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 1993;9(3):291–294.
11. Schulz MS, Russe K, Weiler A, Eichhorn HJ, Strobel HJ. Epidemiology of posterior cruciate ligament injuries. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2003;123(4):186–191.
12. Petrillo S, Volpi P, Papalia R, Maffulli N, Denaro V. Management of combined injuries of the posterior cruciate ligament and posterolateral corner of the knee: A systematic review. *British Medical Bulletin*. 2017;123(1):47–57.

13. Anderson MA, Simeone FJ, Palmer WE, Chang CY. Acute posterior cruciate ligament injuries: effect of location, severity, and associated injuries on surgical management. *Skeletal Radiology*. 2018;1–10.
14. Schlumberger M, Schuster P, Eichinger M, Mayer P, Mayr R, Immendörfer M, Richter J. Posterior cruciate ligament lesions are mainly present as combined lesions even in sports injuries. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2020;28(7):2091–2098.
15. Jung TM, Reinhardt C, Scheffler SU, Weiler A. Stress radiography to measure posterior cruciate ligament insufficiency: A comparison of five different techniques. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2006;14(11):1116–1121.
16. Fanelli GC, Edson CJ. Posterior cruciate ligament injuries in trauma patients: Part II. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 1995;11(5):526–529.
17. Owesen C, Sandven-Thrane S, Lind M, Forssblad M, Granan LP, Årøen A. Epidemiology of surgically treated posterior cruciate ligament injuries in Scandinavia. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2017;25(8):2384–2391.
18. Shelbourne KD, Davis TJ, Patel D V. The Natural History of Acute , Isolated , Nonoperatively Treated Posterior Cruciate Ligament Injuries : A Prospective Study . Shelbourne KD , Davis TJ , Patel DV : Am J Sports Med 27 : 276-283 , 1999. *The American Journal of Sports Medicine*. 1999;27(3):276–283.
19. Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *Knee*. 2006;13(3):184–188.
20. Jung TM, Strobel MJ, Weiler A. Diagnostik und Therapie von Verletzungen des hinteren Kreuzbandes. *Unfallchirurg*. 2006;109(1):41–60.
21. Jung TM, Lubowicki A, Wienand A, Wagner M, Weiler A. Knee stability after posterior cruciate ligament reconstruction in female versus male patients: A prospective matched-group analysis. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2011;27(3):399–403.
22. Verhulst F V., MacDonald P. Diagnosing PCL Injuries: History, Physical Examination, Imaging Studies, Arthroscopic Evaluation. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*. 2020;28(1):2–7.
23. Apsingi S, Nguyen T, Bull AMJ, Unwin A, Deehan DJ, Amis AA. The role of PCL reconstruction in knees with combined PCL and posterolateral corner deficiency. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2008;16(2):104–111.
24. Zorzi C, Alam M, Iacono V, Madonna V, Rosa D, Maffulli N. Combined PCL and PLC reconstruction in chronic posterolateral instability. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2013;21(5):1036–1042.
25. Chen G, Fu W, Tang X, Li Q, Li J. Clinical epidemiological analysis on posterior cruciate ligament injuries. *China journal of orthopaedics and traumatology*. 2015;28(7):638–642.
26. Strobel MJ, Weiler A, Eichhorn HJ. Diagnosis and therapy of fresh and chronic posterior cruciate ligament lesions. *Der Chirurg*;. 2000;71(9):1066–81.
27. M. Strobel T.Zantop. *Arthroskopische Chirurgie - Teil 1 Kniegelenk*. Springer; 2014.
28. Van Dommelen BA, Fowler PJ. Anatomy of the posterior cruciate ligament. *The American Journal of Sports Medicine*. 1989;17(1):24–29.

29. Lopes O V, Ferretti M, Shen W, Ekdahl M, Smolinski P, Fu FH. Topography of the femoral attachment of the posterior cruciate ligament. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2008;90(2):249–255.
30. Girgis FG, Marshall JL, Monajem A, JEM A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. *Clinical orthopaedics and related research*. 1975;(106):216–31.
31. Race A, Amis AA. The mechanical properties of the two bundles of the human posterior cruciate ligament. *Journal of Biomechanics*. 1994;27(1):13–24.
32. Voos JE, Mauro CS, Wentz T, Warren RF, Wickiewicz TL. Posterior cruciate ligament: Anatomy, biomechanics, and outcomes. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(1):222–231.
33. Gupte CM, Smith A, McDermott ID, Bull AMJ, Thomas RD, Amis AA. Menisiofemoral ligaments revisited. Anatomical study, age correlation and clinical implications. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*. 2002;84(6):846–51.
34. Wan ACT, Felle AP. The Menisco-Femoral Ligaments. *Clinical Anatomy*. 1995;8:323–326.
35. Yamamoto M, Hirohata K. Anatomical study on the menisco-femoral ligaments of the knee. *The Kobe journal of medical sciences*. 1991;37(4–5):209–26.
36. Anderson CJ, Ziegler CG, Wijdicks CA, Engebretsen L, LaPrade RF. Arthroscopically pertinent anatomy of the anterolateral and posteromedial bundles of the posterior cruciate ligament. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2012;94(21):1936–1945.
37. Poynton AR, Javadpour SM, Finegan PJ, O'Brien M. The menisiofemoral ligaments of the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 1997;79-B(2):327–330.
38. LaPrade CM, Civitarese DM, Rasmussen MT, LaPrade RF. Emerging Updates on the Posterior Cruciate Ligament A Review of the Current Literature. *The American Journal of Sports Medicine*. 2015;43(12):3077–3092.
39. Scapinelli R. Vascular anatomy of the human cruciate ligaments and surrounding structures. *Clinical Anatomy*. 1997;10(3):151–162.
40. Petersen W, Tillmann B. Blood and lymph supply of the posterior cruciate ligament: a cadaver study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 1999;7(1):42–50.
41. Katonis P, Papoutsidakis A, Aligizakis A, Tzanakakis G, Kontakis GM, Papagelopoulos PJ. Mechanoreceptors of the posterior cruciate ligament. *Journal of International Medical Research*. 2008;36(3):387–393.
42. Çabuk H, Kuşku Çabuk F. Mechanoreceptors of the ligaments and tendons around the knee. *Clinical Anatomy*. 2016;29(6):789–795.
43. Amis AA, Bull AMJ, Gupte CM, Hijazi I, Race A, Robinson JR. Biomechanics of the PCL and related structures: posterolateral, posteromedial and menisiofemoral ligaments. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2003;11(5):271–281.
44. Logterman SL, Wydra FB, Frank RM. Posterior Cruciate Ligament: Anatomy and Biomechanics. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2018;11:510–514.

45. Li G, Gill TJ, DeFrate LE, Zayontz S, Glatt V, Zarins B. Biomechanical consequences of PCL deficiency in the knee under simulated muscle loads - An in vitro experimental study. *Journal of Orthopaedic Research*. 2002;20(4):887–892.
46. Charbonnier C, Duthon VB, Chagué S, Kolo FC, Ménétrey J. In vivo static and dynamic lengthening measurements of the posterior cruciate ligament at high knee flexion angles. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2020;15(3):555–564.
47. Kennedy NI, Wijdicks CA, Goldsmith MT, Michalski MP, Devitt BM, Årøen A, Engebretsen L, Laprade RF. Kinematic analysis of the posterior cruciate ligament, part 1: The individual and collective function of the anterolateral and posteromedial bundles. *American Journal of Sports Medicine*. 2013;41(12):2828–2838.
48. Harner CD, Janaushek MA, Kanamori A, Yagi M, Vogrin TM, Woo SL-Y. Biomechanical Analysis of a Double-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*. 2000;28(2):144–151.
49. Grood ES, Stowers SF, Noyes FR. Limits of movement in the human knee. Effect of sectioning the posterior cruciate ligament and posterolateral structures. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 1988;70(1):88–97.
50. Ogata K, McCarthy JA, Dunlap J, Manske PR. Pathomechanics of posterior sag of the tibia in posterior cruciate deficient knees: An experimental study. *The American Journal of Sports Medicine*. 1988;16(6):630–636.
51. Markolf KL, Feeley BT, Tejwani SG, Martin DE, McAllister DR. Changes in Knee Laxity and Ligament Force After Sectioning the Posteromedial Bundle of the Posterior Cruciate Ligament. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2006;22(10):1100–1106.
52. Petersen W, Zantop T. Biomechanik des hinteren Kreuzbandes und der hinteren instabilität. *Arthroscopie*. 2006;19(3):207–214.
53. Harner CD, Xerogeanes JW, Livesay GA, Carlin GJ, Smith BA, Kusayama T, Kashiwaguchi S, Woo SL-Y. The Human Posterior Cruciate Ligament Complex: An Interdisciplinary Study. *The American Journal of Sports Medicine*. 1995;23(6):736–745.
54. Ahmad CS, Cohen ZA, Levine WN, Gardner TR, Ateshian GA, Mow VC. Codominance of the individual posterior cruciate ligament bundles. *The American Journal of Sports Medicine*. 2003;31(2):221.
55. Gupte CM, Bull AMJ, Thomas RD, Amis AA. The meniscofemoral ligaments: secondary restraints to the posterior drawer. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 2003;85-B(5):765–773.
56. Kozanek M, Fu EC, Van De Velde SK, Gill TJ, Li G. Posterolateral structures of the knee in posterior cruciate ligament deficiency. *American Journal of Sports Medicine*. 2009;37(3):534–541.
57. Nielsen S, Ovesen J, Rasmussen O. The Posterior Cruciate Ligament and Rotatory Knee Instability An Experimental Study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1985;104:53–56.
58. Kaneda Y, Moriya H, Takahashi K, Shimada Y, Tamaki T. Experimental study on external tibial rotation of the knee. *American Journal of Sports Medicine*. 1997;25(6):796–800.

59. Petrigliano FA, Lane CG, Suero EM, Allen AA, Pearle AD. Posterior cruciate ligament and posterolateral corner deficiency results in a reverse pivot shift. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2012;470:815–823.
60. Gill TJ, Defrate LE, Wang C, Carey CT, Zayontz S, Zarins B, Li G. The Biomechanical Effect of Posterior Cruciate Ligament Reconstruction on Knee Joint Function. *The American Journal of Sports Medicine*. 2003;31(4):2003.
61. Noyes FR, Stowers SF, Grood ES, Cummings J, Vanginkel LA. Posterior subluxations of the medial and lateral tibiofemoral compartments: An in vitro ligament sectioning study in cadaveric knees. *The American Journal of Sports Medicine*. 1993;21(3):407–414.
62. Bae JH, Choi IC, Suh SW, Lim HC, Bae TS, Nha KW, Wang JH. Evaluation of the Reliability of the Dial Test for Posterolateral Rotatory Instability: A Cadaveric Study Using an Isotonic Rotation Machine. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2008;24(5):593–598.
63. Markolf KL, Graves BR, Sigward SM, Jackson SR, McAllister DR. Effects of posterolateral reconstructions on external tibial rotation and forces in a posterior cruciate ligament graft. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2007;89(11):2351–2358.
64. Harner CD, Vogrin TM, Höher J, Ma CB, Woo SL-Y. Biomechanical Analysis of a Posterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*. 2000;28(1):32–39.
65. Vogrin TM, Höher J, Årøen A, Woo SLY, Harner CD. Effects of sectioning the posterolateral structures on knee kinematics and in situ forces in the posterior cruciate ligament. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2000;8(2):93–98.
66. Kang KT, Koh YG, Son J, Jung M, Oh S, Kim SJ, Kim SH. Biomechanical influence of deficient posterolateral corner structures on knee joint kinematics: A computational study. *Journal of Orthopaedic Research*. 2018;36(8):2202–2209.
67. 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. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 1993;75(5):694–699.
68. 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):252–255.
69. Van De Velde SK, Bingham JT, Gill TJ, Li G. Analysis of tibiofemoral cartilage deformation in the posterior cruciate ligament-deficient knee. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2009;91(1):167–175.
70. Seebacher JR, Inglis AE, Marshall JL, Warren RF. The structure of the posterolateral aspect of the knee. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 1982;64(4):536–541.
71. Davies H, Unwin A, Aichroth P. The posterolateral corner of the knee: Anatomy, biomechanics and management of injuries. *Injury*. 2004;35(1):68–75.
72. Chahla J, Moatshe G, Dean CS, Laprade RF. Posterolateral Corner of the Knee: Current Concepts. *Arch Bone Jt Surg*. 2016;97(9):97–103.
73. Scheffler S, Strobel M. Posterolaterale Instabilitäten des Kniegelenks: Anatomie, Biomechanik und Therapie. *Arthroskopie*. 2014;27(3):177–188.

74. Watanabe, Y. Moriya, H. Takahashi, M. Yamagata, M. Sonoda, M. Shimada, Y. Tamaki T. Functional anatomy of the posterolateral structures of the knee. *Arthroscopy*. 1993;9(1):57–62.
75. Krudwig WK, Witzel U, Ullrich K. Posterolateral aspect and stability of the knee joint. II. Posterolateral instability and effect of isolated and combined posterolateral reconstruction on knee stability: A biomechanical study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2002;10(2):91–95.
76. Mann RA, Hagy JL. The popliteus muscle. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1977;59(7):924–927.
77. Apsingi S, Nguyen T, Bull AMJ, 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 reco. *American Journal of Sports Medicine*. 2008;36(3):487–494.
78. Gwinner C, Weiler A, Denecke T, Rogasch JMM, Boeth H, Jung TM. Degenerative changes after posterior cruciate ligament reconstruction are irrespective of posterior knee stability: MRI-based long-term results. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2018;138(3):377–385.
79. Boynton MD, Tietjens BR. Long-Term Followup of the Untreated Isolated Posterior Cruciate Ligament- Deficient Knee. *The American Journal of Sports Medicine*. 1996;24(3):306–310.
80. Lubowitz JH, Bernardini BJ, Reid JB. Current concepts review: Comprehensive physical examination for instability of the knee. *American Journal of Sports Medicine*. 2008;36(3):577–594.
81. Margheritini F, Mariani PP. Diagnostic evaluation of posterior cruciate ligament injuries. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2003;11(5):282–288.
82. Rubinstein RA, Shelbourne KD, Mccarroll JR, Vanmeter CD, Rettig AC. The Accuracy of the Clinical Examination in the Setting of Posterior Cruciate Ligament Injuries. *The American Journal of Sports Medicine*. 1994;22(4):550–557.
83. Zhang H, Hong L, Wang X, Zhang J, Geng X, Liu X, Feng H. Single-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction and Mini-Open Popliteofibular Ligament Reconstruction in Knees With Severe Posterior and Posterolateral Rotation Instability: Clinical Results of Minimum 2-Year Follow-up. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2010;26(4):508–514.
84. Laprade RF, Wentorf F. Diagnosis and Treatment of Posterolateral Knee Injuries. *Clinical orthopaedics and related research*. 2002;(402):110–121.
85. Strauss EJ, Ishak C, Inzerillo C, Walsh M, Yildirim G, Walker P, Jazrawi L, Rosen J. Effect of tibial positioning on the diagnosis of posterolateral rotatory instability in the posterior cruciate ligament-deficient knee. *British Journal of Sports Medicine*. 2007;41(8):481–485.
86. Jung YB, Nam CH, Jung HJ, Lee YS, Ko YB. The influence of tibial positioning on the diagnostic accuracy of combined posterior cruciate ligament and posterolateral rotatory instability of the knee. *Clinics in orthopedic surgery*. 2009;1(2):68–73.
87. Ranawat A, Baker CL, Henry S, Harner CD. Posterolateral corner injury of the knee: Evaluation and management. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2008;16(9):506–518.
88. Fanelli GC, Larson R V. Practical management of posterolateral instability of the knee. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2002;18(2):1–8.

89. Fanelli GC, Edson CJ. Combined Posterior Cruciate Ligament-Posterolateral Reconstructions with Achilles Tendon Allograft and Biceps Femoris Tendon Tenodesis: 2- to 10-Year Follow-Up. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2004;20(4):339–345.
90. Lee H-J, Park Y-B, Ko Y-B, Kim S-H, Kwon H-B, Yu D-S, Jung Y-B. The necessity of clinical application of tibial reduction for detection of underestimated posterolateral rotatory instability in combined posterior cruciate ligament and posterolateral corner deficient knee. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2015;23(10):3062–3069.
91. Kowalk DL, Wojtys EM, Disher J, Loubert P. Quantitative analysis of the measuring capabilities of the KT-1000 knee ligament arthrometer. *The American Journal of Sports Medicine*. 1993;21(5):744–747.
92. Ganko A, Engebretsen L, Ozer H. The Rolimeter: A new arthrometer compared with the KT-1000. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2000;8(1):36–39.
93. Daniel DM, Stone ML, Barnett P, Sachs R. Use of the quadriceps active test to diagnose posterior cruciate-ligament disruption and measure posterior laxity of the knee. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*. 1988;70(3):386–91.
94. Huber FE, Irrgang JJ, Harner C, Lephart S. Intratester and intertester reliability of the KT-1000 arthrometer in the assessment of posterior laxity of the knee. *American Journal of Sports Medicine*. 1997;25(4):479–485.
95. Almqvist PO, Ekdahl C, Isberg P-E, Fridén T. Knee rotation in healthy individuals related to age and gender. *Journal of Orthopaedic Research*. 2013;31(1):23–28.
96. Musahl V, Bell KM, Tsai AG, Costic RS, Allaire R, Thore A, Ae Z, Irrgang JJ, Fu FH. Development of a simple device for measurement of rotational knee laxity. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2007;15(1):1009-1012.
97. Hoshino Y, Kuroda R, Nagamune K, Araki D, Kubo S, Yamaguchi M, Kurosaka M. Optimal measurement of clinical rotational test for evaluating anterior cruciate ligament insufficiency. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2012;20(7):1323–1330.
98. Park HS, Wilson NA, Zhang LQ. Gender differences in passive knee biomechanical properties in tibial rotation. *Journal of Orthopaedic Research*. 2008;26(7):937–944.
99. Lorbach O, Wilmes P, Theisen D, Brockmeyer M, Maas S, Kohn D, Seil R. Reliability testing of a new device to measure tibial rotation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2009;17(8):920–926.
100. Moewis P, Boeth H, Heller MO, Yntema C, Jung T, Doyscher R, Ehrig RM, Zhong Y, Taylor WR. Towards understanding knee joint laxity: Errors in non-invasive assessment of joint rotation can be corrected. *Medical Engineering & Physics*. 2014;36(7):889–895.
101. Kothari A, Haughom B, Subburaj K, Feeley B, Li X, Ma CB. Evaluating rotational kinematics of the knee in ACL reconstructed patients using 3.0 Tesla magnetic resonance imaging. *The Knee*. 2012;19(5):648–651.

102. Espregueira-Mendes J, Pereira H, Sevivas N, Passos C, Vasconcelos JC, Monteiro A, Oliveira JM, Reis L, Espregueira-Mendes J, Pereira ÁH, Sevivas ÁN, Passos ÁC, Vasconcelos JC, Monteiro ÁA, et al. Assessment of rotatory laxity in anterior cruciate ligament-deficient knees using magnetic resonance imaging with Porto-knee testing device. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20:671–678.
103. Bleday RM, Fanelli GC, Giannotti BF, Edson CJ, Barrett TA. Instrumented measurement of the posterolateral corner. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* 1998;14(5):489–494.
104. Song EK, Seon JK, Park SJ, Hur CI, Lee DS. In vivo laxity of stable versus anterior cruciate ligament-injured knees using a navigation system: A comparative study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 2009;17(8):941–945.
105. Sonin AH, Fitzgerald SW, Hoff FL, Friedman H, Bresler ME. MR imaging of the posterior cruciate ligament: normal, abnormal, and associated injury patterns. *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc.* 1995;15(3):551–561.
106. Schulz MS, Russe K, Lampakis G, Strobel MJ. Reliability of stress radiography for evaluation of posterior knee laxity. *American Journal of Sports Medicine.* 2005;33(4):502–506.
107. DePhillipo NN, Kane PW, Engebretsen L. Stress Radiographs for Ligamentous Knee Injuries. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* 2021;37(1):15–16.
108. Hewett TE, Noyes FR, Lee MD. Diagnosis of complete and partial posterior cruciate ligament ruptures: Stress radiography compared with KT-1000 arthrometer and posterior drawer testing. *American Journal of Sports Medicine.* 1997;25(5):648–655.
109. Schatka I, Weiler A, Jung TM, Walter TC, Gwinner C. High tibial slope correlates with increased posterior tibial translation in healthy knees. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 2017:1–7.
110. Strobel MJ, Weiler A, Schulz MS, Russe K, Eichhorn HJ. Fixed posterior subluxation in posterior cruciate ligament-deficient knees: Diagnosis and treatment of a new clinical sign. *American Journal of Sports Medicine.* 2002;30(1):32–38.
111. Laprade RF, Gilbert TJ, Bollom TS, Wentorf F, Chaljub G. the Magnetic Resonance Imaging Appearance of Individual Structures of the Posterolateral Knee. *The American journal of sports medicine.* 2000;28(2).
112. Kim JG, Lee YS, Kim YJ, Shim JC, Ha JK, Park HA, Yang SJ, Oh SJ. Correlation between the rotational degree of the dial test and arthroscopic and physical findings in posterolateral rotatory instability. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 2009;18(1):123–129.
113. Fineberg MS, Duquin TR, Axelrod JR. Arthroscopic Visualization of the Popliteus Tendon. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* 2008;24(2):174–177.
114. Schuttler KF, Ziring E, Ruchholtz S, Efe T. Verletzungen des hinteren Kreuzbands. *Der Unfallchirurg.* 2017;120(1):55–68.
115. Shelbourne KD, Muthukaruppan Y. Subjective results of nonoperatively treated, acute, isolated posterior cruciate ligament injuries. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery.* 2005;21(4):457–461.

116. Shelbourne KD, Clark M, Gray T. Minimum 10-year follow-up of patients after an acute, isolated posterior cruciate ligament injury treated nonoperatively. *American Journal of Sports Medicine*. 2013;41(7):1526–1533.
117. Wang D, Graziano J, Williams RJ, Jones KJ. Nonoperative Treatment of PCL Injuries: Goals of Rehabilitation and the Natural History of Conservative Care. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2018;11(2):290–297.
118. Pierce CM, O'Brien L, Griffin LW, LaPrade RF. Posterior cruciate ligament tears: Functional and postoperative rehabilitation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2013;21(5):1071–1084.
119. Winkler PW, Zsidai B, Wagala NN, Hughes JD, Horvath A, Senorski EH, Samuelsson K, Musahl V. Evolving evidence in the treatment of primary and recurrent posterior cruciate ligament injuries, part 2: surgical techniques, outcomes and rehabilitation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2021;29(3):682–693.
120. Devitt BM, Dissanayake R, Clair J, Napier RJ, Porter TJ, Feller JA, Webster KE. Isolated Posterior Cruciate Reconstruction Results in Improved Functional Outcome but Low Rates of Return to Preinjury Level of Sport: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2018;6(10).
121. Tsukada H, Ishibashi Y, Tsuda E, Fukuda A, Yamamoto Y, Toh S. Biomechanical evaluation of an anatomic double-bundle posterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2012;28(2):264–271.
122. Wiley WB, Askew MJ, Melby A, Noe DA. Kinematics of the posterior cruciate ligament/posterolateral corner-injured knee after reconstruction by single- and double-bundle intra-articular grafts. *American Journal of Sports Medicine*. 2006;34(5):741–748.
123. Kohen RB, Sekiya JK. Single-Bundle Versus Double-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2009;25(12):1470–1477.
124. Bergfeld JA, Graham SM, Parker RD, Valdevit ADC, Kambic HE. A Biomechanical Comparison of Posterior Cruciate Ligament Reconstructions Using Single- and Double-Bundle Tibial Inlay Techniques. *The American Journal of Sports Medicine*. 2005;33(7):976–981.
125. Mutnal A, Leo BM, Vargas L, Colbrunn RW, Butler RS, Uribe JW. Biomechanical Analysis of Posterior Cruciate Ligament Reconstruction With Aperture Femoral Fixation. *Orthopedics*. 2015;38(1):9–16.
126. Yoon KH, Bae DK, Song SJ, Cho HJ, Lee JH. A prospective randomized study comparing arthroscopic single-bundle and double-bundle posterior cruciate ligament reconstructions preserving remnant fibers. *American Journal of Sports Medicine*. 2011;39(3):474–480.
127. 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. *American Journal of Sports Medicine*. 2009;37(8):1499–1507.

128. Jackson WFM, van der Tempel WM, Salmon LJ, Williams HA, Pinczewski LA. Endoscopically-assisted single-bundle posterior cruciate ligament reconstruction: Results at minimum ten-year follow up. *Journal of Bone and Joint Surgery - British Volume*. 2008;90-B(10):1328–1333.
129. Tucker CJ, Joyner PW, Endres NK. Single Versus Double-Bundle PCL Reconstruction: Scientific Rationale and Clinical Evidence. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2018;11(2):285–289.
130. Fanelli GC, Beck JD, Edson CJ. Single compared to double-bundle PCL reconstruction using allograft tissue. *The journal of knee surgery*. 2012;25(1):59–64.
131. Yoon KH, Kim EJ, Kwon YB, Kim SG. Minimum 10-Year Results of Single- Versus Double-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction: Clinical, Radiologic, and Survivorship Outcomes. *American Journal of Sports Medicine*. 2019;47(4):822–827.
132. Höher J, Scheffler S, Weiler A. Graft choice and graft fixation in PCL reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2003;11:297–306.
133. Fanelli GC. PCL Transtibial Tunnel Reconstruction. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*. 2020;28(1):8–13.
134. Stannard JP. Tibial Inlay Posterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*. 2020;28(1):14–17.
135. Vellios EE, Jones KJ, McAllister DR. Open Tibial Inlay PCL Reconstruction: Surgical Technique and Clinical Outcomes. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2018;11(2):316–319.
136. Osti M, Hierzer D, Seibert FJ, Benedetto KP. The Arthroscopic All-Inside Tibial-Inlay Reconstruction of the Posterior Cruciate Ligament: Medium-Term Functional Results and Complication Rate. *Journal of Knee Surgery*. 2017;30(3):238–243.
137. Lee D-Y, Kim D-H, Kim H-J, Ahn H-S, Lee T-H, Hwang S-C. Posterior Cruciate Ligament Reconstruction With Transtibial or Tibial Inlay Techniques: A Meta-analysis of Biomechanical and Clinical Outcomes. *The American Journal of Sports Medicine*. 2018;46(11):2789–2797.
138. Rhatomy S, Abadi MBT, Setyawan R, Asikin AIZ, Soekarno NR, Imelda LG, Budhiparama NC. Posterior cruciate ligament reconstruction with peroneus longus tendon versus hamstring tendon: a comparison of functional outcome and donor site morbidity. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2020;29(4):1045–1051.
139. Gelber PE, Drager J, Maheshwer B, Leyes M, Barenius B, Robinson J, Pujol N, Tischer T, Margheritini F, Fritsch B, Frosh KH, Chahla J. Large variability exists in the management of posterolateral corner injuries in the global surgical community. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2020;28(7):2116–2123.
140. Amer JW, Johannsen AM, Ruzbarsky JJ, Godin JA. Open Popliteal Tendon Repair. *Arthroscopy Techniques*. 2021;10(2):499–505.
141. Kim S-J, Shin S-J, Jeong J-H. Posterolateral rotatory instability treated by a modified biceps rerouting technique: Technical considerations and results in cases with and without posterior cruciate ligament insufficiency. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2003;19(5):493–499.

142. Fanelli GC. Surgical Treatment of Lateral Posterolateral Instability of the Knee Using Biceps Tendon Procedures. *Sports Med Arthrosc Rev.* 2006;14:37–43.
143. Larson R V. Isometry of the lateral collateral and popliteofibular ligaments and techniques for reconstruction using a free semitendinosus tendon graft. *Operative Techniques in Sports Medicine.* 2001;9(2):84–90.
144. Strobel MJ, Schulz MS, Petersen WJ, Eichhorn HJ. Combined anterior cruciate ligament, posterior cruciate ligament, and posterolateral corner reconstruction with autogenous hamstring grafts in chronic instabilities. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* 2006;22(2):182–192.
145. Grimm NL, Levy BJ, Jimenez AE, Bell R, Arciero RA. Open Anatomic Reconstruction of the Posterolateral Corner: The Arciero Technique. *Arthroscopy Techniques.* 2020;9(9):1409–1414.
146. van Gennip S, van der Wal WA, Heesterbeek PJC, Wymenga AB, Busch VJJF. Posterolateral corner reconstruction in combined injuries of the knee: Improved stability with Larson’s fibular sling reconstruction and comparison with LaPrade anatomical reconstruction. *Knee.* 2020;27(1):124–131.
147. Treme GP, Salas C, Ortiz G, Gill GK, Johnson PJ, Menzer H, Richter DL, Qeadan F, Wascher DC, Schenck RC. A Biomechanical Comparison of the Arciero and LaPrade Reconstruction for Posterolateral Corner Knee Injuries. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine.* 2019;7(4):1–7.
148. Kolb JP, Frings J, Krause M, Hartel M, Frosch KH. An All-Arthroscopic Technique for Complex Posterolateral Corner Reconstruction. *Arthroscopy Techniques.* 2019;8(9):999–1006.
149. Novaretti J V, Sheehan AJ, Lian J, De Groot J, Musahl V. The Role of Osteotomy for the Treatment of PCL Injuries. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine.* 2018;11(2):298–306.
150. Philippe Moewis. Understanding rotational joint laxity in the human knee. Technische Universität Berlin. 2016.
151. Moewis P, Duda GN, Jung T, Heller MO, Boeth H, Kaptein B, Taylor WR. The Restoration of Passive Rotational Tibio-Femoral Laxity after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Rudan J, ed. *PLOS ONE.* 2016;11(7):1–14.
152. Lind M, Jakobsen BW, Lund B, Hansen MS, Abdallah O, Christiansen SE. Anatomical reconstruction of the medial collateral ligament and posteromedial corner of the knee in patients with chronic medial collateral ligament instability. *American Journal of Sports Medicine.* 2009;37(6):1116–1122.
153. Lee, Dhong Won, Jang, Hyoung Won, Lee, Yong Seuk, Oh, Soo Jin, Kim, Jae Young, Song, Han Eui, Kim JG. Clinical, Functional, and Morphological Evaluations of Posterior Cruciate Ligament Reconstruction With Remnant Preservation. *The American Journal of Sports Medicine.* 2014;42(8):1822–1831.
154. Song JG, Kim HJ, Han JH, Bhandare NN, Shetty GM, Kang SB, Song YW, Nha KW. Clinical Outcome of Posterior Cruciate Ligament Reconstruction with and Without Remnant Preservation. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* 2015;31(9):1796–1806.
155. Hefti E, Müller W, Jakob RP, Stäubli HU. Evaluation of knee ligament injuries with the IKDC form. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 1993;1(3–4):226–234.

156. Irrgang, James J, Anderson, Allen F, Boland, Arthur L, Harner, Christopher D, Kurosaka, Masahiro, Neyret, Phillipe, Richmond, John C, Donald Shelborne K. Development and Validation of the International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form*. *The American journal of sports medicine*. 2001;29(5):600–613.
157. Collins NJ, Misra D, Felson DT, Crossley KM, Roos EM. Measures of knee function: International Knee Documentation Committee (IKDC) Subjective Knee Evaluation Form, Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score Physical Function Short Form (KOOS-PS), Knee Ou. *Arthritis care & research*. 2011;63 Suppl 1(0 11):S208-28.
158. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clinical orthopaedics and related research*. 1985;(198):43–9.
159. Roos EM, Roos HP, Lohmander LS, Ekdahl C, Beynnon BD. Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (K00S)--Development of a Self-Administered Outcome Measure. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 1998;78(2):88–96.
160. Ware JE, Sherbourne CD. The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Medical care*. 1992;30(6):473–83.
161. Kurth B-M, Ellert U. The SF-36 questionnaire and its usefulness in population studies: results of the German Health Interview and Examination Survey 1998. *Sozial- und Praventivmedizin*. 2002;47(4):266–77.
162. Lins L, Carvalho FM. SF-36 total score as a single measure of health-related quality of life: Scoping review. *SAGE Open Medicine*. 2016;4:1–12.
163. Jacobsen K. Stress radiographical measurement of the anteroposterior, medial and lateral stability of the knee joint. *Acta orthop. scand*. 1976;47:335–341.
164. Tsai AG, Musahl V, Steckel H, Bell KM, Zantop T, Irrgang JJ, Fu FH. Rotational knee laxity: Reliability of a simple measurement device in vivo. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2008;9(35).1-9.
165. Garling EH, Kaptein BL, Geleijns K, Nelissen RGHH, Valstar ER. Marker Configuration Model-Based Roentgen Fluoroscopic Analysis. *Journal of Biomechanics*. 2005;38(4):893–901.
166. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI*. 2015:234–241.
167. Ehlke M, Ramm H, Lamecker H, Hege HC, Zachow S. Fast generation of virtual X-ray images for reconstruction of 3D anatomy. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2013;19(12):2673–2682.
168. Markelj P, Tomažević D, Likar B, Pernuš F. A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions. *Medical image analysis*. 2012;16(3):642–61.
169. van der Bom IMJ, Klein S, Staring M, Homan R, Bartels LW, Pluim JPW. Evaluation of optimization methods for intensity-based 2D-3D registration in x-ray guided interventions. In: *Medical Imaging 2011: Image Processing*.; 2011:796223.

170. Penney GP, Weese J, Little JA, Desmedt P, Hill DLG, Hawkes DJ. A comparison of similarity measures for use in 2-D-3-D medical image registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1998;17(4):586–595.
171. von Tyrowicz C, Ambellan F, Mukhopadhyay A, Zachow S. An efficient Riemannian statistical shape model using differential coordinates: With application to the classification of data from the Osteoarthritis Initiative. *Medical Image Analysis*. 2018;43:1–9.
172. Ehrig RM, Taylor WR, Duda GN, Heller MO. A survey of formal methods for determining functional joint axes. *Journal of Biomechanics*. 2007;40:2150–2157.
173. Lahner M, Vogel T, Schulz MS, Strobel MJ. Outcome 4 years after isolated single-bundle posterior cruciate ligament reconstruction. *Orthopade*. 2012;41(3):206–211.
174. Kim SJ, Lee SK, Kim SH, Kim SH, Jung M. Clinical outcomes for reconstruction of the posterolateral corner and posterior cruciate ligament in injuries with mild grade 2 or less posterior translation: Comparison with isolated posterolateral corner reconstruction. *American Journal of Sports Medicine*. 2013;41(7):1613–1620.
175. Mygind-Klavsen B, Nielsen TG, Lind MC. Outcomes after posterior cruciate ligament (PCL) reconstruction in patients with isolated and combined PCL tears. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2017;5(4).
176. LaPrade RF, Cinque ME, Dornan GJ, DePhillipo NN, Geeslin AG, Moatshe G, Chahla J. Double-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction in 100 Patients at a Mean 3 Years' Follow-up: Outcomes Were Comparable to Anterior Cruciate Ligament Reconstructions. *American Journal of Sports Medicine*. 2018;46(8):1809–1818.
177. Yang J-H, Yoon J-R, Jeong H-I, Hwang D-H, Woo S-J, Kwon J-H, Nha K-W, Md S. Second-Look Arthroscopic Assessment of Arthroscopic Single-Bundle Posterior Cruciate Ligament Reconstruction Comparison of Mixed Graft Versus Achilles Tendon Allograft. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(9):2052–2060.
178. Lien OA, Aas EJJ, Johansen S, Ludvigsen TC, Figved W, Engebretsen L. Clinical outcome after reconstruction for isolated posterior cruciate ligament injury. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2010;18(11):1568–1572.
179. Ihle C, Ateschrang A, Albrecht D, Mueller J, Stöckle U, Schröter S. Occupational consequences after isolated reconstruction of the insufficient posterior cruciate ligament. *BMC Research Notes*. 2014;7(1):1–9.
180. Moslemian A, Sidhu R, Roessler P, Wood R, Degen R, Getgood A, Willing R. Influence of the posterior cruciate ligament on kinematics of the knee during experimentally simulated clinical tests and activities of daily living. *Journal of Biomechanics*. 2021;115:110–33.
181. Apsingi S, Nguyen T, Bull AMJ, 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 Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2009;17(3):305–312.

182. Miyatake S, Kondo E, Tsai TY, Hirschmann M, Halewood C, Jakobsen BW, Yasuda K, Amis AA. Biomechanical comparisons between 4-strand and modified larsen 2-strand procedures for reconstruction of the posterolateral corner of the knee. *American Journal of Sports Medicine*. 2011;39(7):1462–1469.
183. Mauro CS, Sekiya JK, Stabile KJ, Haemmerle MJ, Harner CD. Double-bundle PCL and posterolateral corner reconstruction components are codominant. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2008;466(9):2247–2254.
184. Pacheco RJ, Ayre CA, Bollen SR. Posterolateral corner injuries of the knee a serious injury commonly missed. *J Bone Joint Surg [Br]*. 2011;93:194–7.
185. Maheshwer B, Drager J, John NS, Williams BT, LaPrade RF, Chahla J. Incidence of Intraoperative and Postoperative Complications After Posterolateral Corner Reconstruction or Repair: A Systematic Review of the Current Literature. *American Journal of Sports Medicine*. 2021:1–10.
186. Kim SJ, Kim SG, Lee IS, Han HD, Chung IH, Kim SH, Gorthi V. Effect of physiological posterolateral rotatory laxity on early results of posterior cruciate ligament reconstruction with posterolateral corner reconstruction. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 2013;95(13):1222–1227.
187. Nielsen S, Ovesen J, Rasmussen O. The Posterior Cruciate Ligament and Rotatory Knee Instability An Experimental Study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1985;104:53–56.
188. Wiley WB, Askew MJ, Iii AM, Noe DA. Kinematics of the Posterior Cruciate Ligament/Posterolateral Corner-Injured Knee After Reconstruction by Single-and Double-Bundle Intra-articular Grafts. *American Journal of Sports Medicine*. 2006;34(5):741–748.

6.2 Eidesstattliche Versicherung

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Stephan Oehme, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Die passive tibiofemorale Rotationsstabilität bei Patienten mit Rekonstruktion des hinteren Kreuzbandes – eine prospektive Analyse der in vivo Kinematik“ - „Passive tibiofemoral rotational stability in patients undergoing reconstruction of the posterior cruciate ligament - a prospective analysis of in vivo kinematics“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

6.3 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

6.4 Veröffentlichungen

Oehme S, Moewis P, Bartek B, Lippert A , von Tycowicz C, Boeth H, Duda GN, Jung TM:
Die passive tibiofemorale Rotationsstabilität bei Patienten mit Rekonstruktion des
hinteren Kreuzbandes – eine prospektive Analyse der *in vivo* Kinematik

Wissenschaftlicher Vortrag auf dem Deutschen Kongress für Orthopädie und
Unfallchirurgie (DKOU) 2019, in Berlin, Deutschland

6.5 Danksagung

Ein herausragender Dank gilt Dr. med. Tobias Jung und Dr. med. Benjamin Bartek für die jahrelange, hervorragende Betreuung und dafür, dass sie wirklich zu jeder Zeit ein offenes Ohr für mich hatten.

Bedanken möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. Carsten Perka für die exzellente Betreuung und die Möglichkeit diese Arbeit in seiner Klinik durchführen zu dürfen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Ing. Georg Duda für seine Unterstützung und für die Möglichkeit diese Arbeit in Zusammenarbeit mit seinem Institut durchführen zu können.

Auch den beteiligten Mitarbeitern des Julius Wolff Institut gilt mein besonderer Dank für die stetige Hilfe im Labor und der Datenaufbereitung. Insbesondere möchte ich mich hiermit bei Dr. Ing. Philippe Moewis und Dr. Ing Heide Boeth bedanken, aber auch bei allen anderen Mitarbeitern, die mich stets bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein weiterer Dank gilt Dr. rer. nat. Rainald Ehrig und Dr. rer. nat. Christoph von Tycowicz vom Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin für die Unterstützung in der Datenverarbeitung.

Ein herzlicher Dank gilt meiner Mitstreiterin und Kollegin Annika Lippert für die großartige und freudensreiche Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden für die uneingeschränkte moralische und auch tatkräftige Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Gewidmet meiner Mutter für ihre Liebe und ihre lebenslange Unterstützung.

6.6 Bescheinigung Statistik



CharitéCentrum für Human- und Gesundheitswissenschaften

Charité | Campus Charité Mitte | 10117 Berlin

Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBikE)

Direktor: Prof. Dr. Geraldine Rauch

Postanschrift:
Charitéplatz 1 | 10117 Berlin
Besucheranschrift:
Reinhardtstr. 58 | 10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 450 562171
geraldine.rauch@charite.de
<https://biometrie.charite.de/>



Name, Vorname: Oehme, Stephan
Emailadresse: stephan.oehme@charite.de
Matrikelnummer: [REDACTED]
PromotionsbetreuerIn: Prof. Carsten Perka, Dr. Tobias Jung
Promotionsinstitution / Klinik: Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie

Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass Stephan Oehme innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBikE) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 28.01.2021

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Hinweis auf explorativen Charakter der Datenanalyse
- Empfehlung von nichtparametrischen Methoden zur Analyse der Subgruppen aufgrund kleiner Fallzahl

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 20.07.2021

Name der Beraterin: Mareen Pigorsch

Mareen
Pigorsch

Digital unterschrieben von
Mareen Pigorsch
Datum: 2021.07.20 13:08:33
+02'00'

Unterschrift Beraterin, Institutsstempel

