

AUS DEM FACHBEREICH 4 (KLINISCHE MEDIZIN)

DER UNIVERSITÄT DES SAARLANDES, HOMBURG/SAAR

Der Effekt verschiedener kniegelenknaher, tibialer und femoraler Osteotomietechniken auf Keilvolumina und Osteotomieoberflächen

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

(der Theoretischen Medizin, der Zahnheilkunde oder der Naturwissenschaften)

der Medizinischen Fakultät der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES 2014

Vorgelegt von:

Manuel Haag

geb. am 14.12.1973 in Öttingen/Bayern

AUS DER ORTHOPÄDISCHEN KLINIK,

Centre Hospitalier de Luxembourg - Clinique d'Eich

Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität des Saarlandes

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung / Abstract	4
1.1 Zusammenfassung	4
1.2 Abstract	7
2. Einleitung und Zielsetzung der Studie	8
2.1 Einleitung	8
2.2 Zielsetzung der Studie	13
3. Material und Methoden	15
3.1 Gruppenverteilung - Proximale tibiale valgierende Osteotomien	15
3.2 Standards der operativen HTO Techniken	15
3.2.1 Medial uniplanar aufklappende HTO Technik (Gruppe HTO 1)	16
3.2.2 Medial biplanar aufklappende HTO Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2)	17
3.2.3 Medial biplanar aufklappende HTO Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 3)	18
3.2.4 Lateral uniplanar zuklappende HTO Technik (Gruppe HTO 4)	18
3.3 Gruppenverteilung - Distale femorale varisierende Osteotomien	21
3.4 Standards der operativen DFO Techniken	21
3.4.1 Lateral uniplanar aufklappende DFO Technik (Gruppe DFO 1)	22
3.4.2 Medial uniplanar zuklappende DFO Technik (Gruppe DFO 2)	23
3.4.3 Lateral biplanar aufklappende DFO Technik (Gruppe DFO 3)	24
3.4.4 Medial biplanar zuklappende DFO Technik (Gruppe DFO 4)	25
3.5 Kennzeichnung und Quantifizierung der Osteotomieflächen	28

3.6	Berechnung der Keilvolumen	30
3.7	Statistische Auswertung	31
4.	Ergebnisse	32
4.1	Ergebnisse der HTO-Techniken	32
4.1.1	Oberflächen der unterschiedlichen Tibiaebenen	32
4.1.2	Keilvolumen in Abhängigkeit von den HTO Osteotomietechniken	34
4.2	Ergebnisse der DFO-Techniken	37
4.2.1	Oberflächen der unterschiedlichen femoralen Ebenen	37
4.2.2	Keilvolumen in Abhängigkeit von den DFO Osteotomietechniken	40
5.	Diskussion	42
5.1	Wichtigste Erkenntnisse HTO & DFO	42
5.2	Primäre und sekundäre Knochenheilung	43
5.3	Kontaktfläche der Osteotomie	44
5.4	Geometrische Folgerung	45
5.5	Lateral schließende HTO	46
5.6	Einschränkungen der Studie	48
5.7	Schlussfolgerung	49
6.	Literaturverzeichnis	52
7.	Publikationen / Dank	59
7.1	Publikationen	59
7.2	Dank	59

1. Zusammenfassung / Abstract

1.1 Zusammenfassung

Hintergrund:

Die biplanare Operationstechnik kniegelenknaher Korrekturosteotomien soll im Gegensatz zur uniplanaren Technik die Heilung des Knochens begünstigen. Dies wird den der größeren spongiösen Knochenoberflächen und resultierenden Kontaktflächen sowie kleineren Keilvolumina Keilvolumen nach biplanarer Osteotomieführung zugeschrieben. Die Keilvolumina Keilvolumen entsprechen den resultierenden knöchernen Defektzonen nach vollzogener trapezoider Öffnung des Osteotomiespaltes.

Obwohl die genaue Größe von Osteotomiespalt und resultierenden spongiösen Flächen unbekannt ist, werden aufgrund dieser geometrischen Faktoren heutzutage biplanare Techniken für die varisierende proximale tibiale Osteotomie (HTO) und die valgusierende distale Femurosteotomie (DFO) zunehmend bevorzugt. Präzise Daten, die Auskunft Angaben über die Größe der knöchernen Oberflächen und das zu füllende Keilvolumen nach aufklappender und zuklappender Osteotomie geben, existieren nicht.

Hypothese und Ziel der Arbeit:

Es wird die Hypothese untersucht, ob biplanare, auf- und zuklappende kniegelenksnahe Osteotomien den geometrischen Voraussetzungen für die Knochenheilung besser entsprechen als uniplanare auf- und zuklappende Techniken.

Hierzu erfolgt die Quantifizierung von spongiösen Oberflächen und Keilvolumina nach unterschiedlichen etablierten Osteotomietechniken.

Material und Methode:

In einem standardisierten Studienprotokoll wurden 20 femorale Kunstknochen für distale femorale Osteotomien (DFO) und 20 tibiale Kunstknochen für proximale tibiale Osteotomien (HTO) jeweils vier verschiedenen Gruppen zugeordnet. Für proximale tibiale valgusierende Osteotomien (HTO) erfolgte in der Gruppe HTO 1 eine medial aufklappende uniplanare Technik; in der Gruppe HTO 2 eine medial aufklappende biplanare Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie; in der Gruppe HTO 3 eine medial aufklappende biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie; und in der Gruppe HTO 4 eine lateral zuklappende uniplanare chirurgische Technik.

Für distale femorale valgusierende Osteotomien (DFO) erfolgte in der Gruppe DFO 1 eine lateral aufklappende uniplanare Technik; in der Gruppe DFO 2 eine medial zuklappende monoplanare Technik; in der Gruppe DFO 3 eine lateral aufklappende biplanare Technik; und in der Gruppe DFO 4 eine medial zuklappende biplanare chirurgische Technik.

Die Knochenoberfläche aller Osteotomieebenen wurde digitalisiert und quantifiziert. Die entstehenden Keilvolumina Keilvolumen unter den standardisierten subtrahierenden oder addierenden Korrekturen mit einer Keilbasishöhe von je 5, 10 und 15 mm wurden unter Anwendung einer prisma-basierten Algorithmus bestimmt.

Ergebnisse der HTO- Untersuchungsserie:

Die biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 3) erzeugte eine signifikant größere Knochenoberfläche im Vergleich zu der "klassischen" biplanaren Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2) sowie im Vergleich zu der aufklappenden (Gruppe HTO 1) und zuklappenden uniplanaren Techniken (Gruppe HTO 4). Die Knochenoberfläche nach der "klassischen" aufklappenden biplanaren Technik (Gruppe HTO 2) war signifikant größer als nach den uniplanaren Techniken (Gruppe HTO 1 und HTO 4).

Bezüglich der entstandenen Keilvolumina der „addierenden“ Methoden bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den biplanaren aufklappenden Techniken mit absteigender (Gruppe HTO 3) und aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2). Keilvolumina nach aufklappender biplanarer Technik (Gruppe HTO 2 und HTO 3) waren jedoch signifikant kleiner im Vergleich zu der uniplanaren aufklappenden Technik (Gruppe HTO 1). Das Keilvolumen der „subtrahierenden“ lateral zuklappenden uniplanaren Technik (Gruppe HTO 4) war ist in der Annäherung gleich Null.

Ergebnisse der DFO- Untersuchungsserie:

Die biplanaren Osteotomietechniken (Gruppe DFO 3 und DFO 4) erzeugten eine signifikant größere spongiöse Knochenoberfläche als die uniplanaren Techniken (Gruppe DFO 1 und DFO 2) ($p = 0.036$). Knochenoberflächen waren nach lateral aufklappender biplanarer Osteotomie (Gruppe DFO 3) geringfügig größer, als nach medial zuklappender biplanarer Technik (Gruppe DFO 4). Das Keilvolumen war erwartungsgemäß signifikant höher nach den „addierenden“ lateral aufklappenden Techniken (Gruppe DFO 1 und Gruppe DFO 3) im Vergleich zu den „subtrahierenden“, medial zuklappenden Techniken (Gruppe DFO 2 und DFO 4). Letztere zeigen methodisch bedingt nahezu nicht vorhandene Keilvolumina. Der Vergleich innerhalb der „addierenden“ lateral aufklappenden Techniken zeigte unabhängig von dem Grad der Öffnung immer ein geringfügig größeres Keilvolumen beim uniplanaren als beim biplanaren Vorgehen.

Diskussion und Schlussfolgerung:

Die knöchernen Geometrie nach HTO legt den Schluss nahe, dass die biplanaren, medial aufklappenden (öffnenden) Techniken Knochenkeile mit geringerem Volumen sowie größerer spongiöser Knochenoberfläche aufweisen, als eine uniplanar aufklappende Technik. Die chirurgisch weniger attraktive „subtrahierende“ lateral zuklappende (schließende) Technik besitzt eine mit der uniplanar aufklappenden Technik identischen spongiösen Knochenoberfläche, aber ein de facto nicht vorhandenes Knochenkeilvolumen. Bezüglich des Parameters „Knochenkeilvolumen“ zeigt die „subtrahierende“ lateral zuklappende Technik im Vergleich zu den „addierenden“ Methoden die besten geometrischen Voraussetzungen für die Heilung. Die

„addierenden“ Methoden unter sich verglichen, zeigen einen geometrischen Vorteil der biplanaren, medial aufklappenden Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie.

Für die HTO bedeutet das, dass unter Vernachlässigung der komplikationsträchtigen lateral zuklappenden Technik, für die klinische Praxis prinzipiell die biplanaren Osteotomien die geometrisch bevorteilten Techniken wären. Sie kreieren bei relativ kleinem Keilvolumen gleichzeitig eine große knöcherne, spongiöse Oberfläche. Insbesondere bei höheren Korrekturen sollte eine absteigende Tuberositasosteotomie bevorzugt werden, da dadurch nicht nur eine Patella infera vermieden, sondern auch geometrisch eine höhere frontale Kontaktzone gewährleistet wird.

Für die DFO zeigen die biplanaren Techniken und insbesondere die medial zuklappende (schließende) Technik bezüglich Keilvolumen, knöcherner spongiöser Oberfläche sowie knöcherner Kontaktzone optimierte geometrische Voraussetzungen. Nur die biplanaren DFO Techniken ermöglichen darüber hinaus die transversalen Schnitte metaphysär in Höhe von und dorsal der Trochlea zu setzen. Das ist ein zusätzlicher Vorteil, da der metaphysäre Knochen biologisch ein höheres Heilungspotenzial als die Diaphyse zeigt.

1.2 Abstract

Bone geometry following osteotomies around the knee suggest that the biplanar open-wedge techniques simultaneously create smaller wedge volumes and larger bone surface areas compared to the uniplanar open-wedge techniques. Although this idealized geometric view on bony geometry excludes all biologic factors that might influence bone healing, the current data suggest a general rule for the applied standard osteotomy techniques and all of their surgical modifications: reducing the amount of slow gap healing and simultaneously increasing the area of cancellous bone may be beneficial for osteotomy healing. Thus, a biplanar rather than a uniplanar osteotomy may be performed for osteotomies around the knee.

2. Einleitung und Zielsetzung der Studie

2.1 Einleitung

Die hohe Tibiaosteotomie (HTO) und die distale Femurosteotomie (DFO) gelten heute als etablierte Methoden für die Behandlung der unikompartimentellen Varus- beziehungsweise Valgusgonarthrose (Amendola und Bonasia, 2010). Die Osteotomie verändert die knöchernen Achse und verschiebt dadurch die mechanische Belastung weg vom degenerierten und hin zum intakten Gelenkkompartiment. Durch diese Verschiebung der mechanischen Achse reduziert sich der Belastungsschmerz im geschädigten Gelenkkompartiment.

Die Varusgonarthrose ist definitionsgemäß ein schwerpunktmäßiger Arthrosebefall des medialen Gelenkkompartiments. Sie ist in den überwiegenden Fällen mit einer tibialen Varusfehlstellung vergesellschaftet. Die Indikation für eine operative Achskorrektur liegt vor allem dann gegeben, wenn eine knöchernen Varusfehlstellung und ein intaktes laterales Gelenkkompartiment vorliegen. Die Schäden des medialen Gelenkkompartiments können von leichten, erstgradigen bis viertgradigen Knorpelschädigungen reichen. Umstritten ist eine präventive Umstellung bei Tibia vara ohne manifeste Strukturschäden. Für die hohe valgusierende tibiale Osteotomie (HTO) stehen lateral zuklappende sowie medial aufklappende Techniken zur Verfügung (Amendola und Bonasia, 2010). Die Begrifflichkeiten aufklappend, öffnend sowie addierend und zuklappend, schließend sowie subtrahierend werden in der Literatur als gleichbedeutend verwendet. In der vorliegenden Arbeit soll der Begriff „aufklappend“ synonym für die Ausdrücke „addierend“ und „öffnend“, der Begriff „schließend“ synonym für die Ausdrücke „subtrahierend“ oder „closed wedge“ verwendet werden.

Die aufklappende Technik setzt sich in ihrer biplanaren Ausführung zunehmend als „goldener Standard“ durch. Sie zeigt insbesondere in Kombination mit einem winkelstabilen Plattenfixateur reproduzierbare gute klinische Ergebnisse mit einer geringen Komplikationsrate. Gute bis ausgezeichnete Ergebnisse werden aber auch für die lateral schließende HTO berichtet (Jakob und Jacobi, 2004). Obwohl eine ausreichende Zahl an Studien über HTO-Ergebnisse verfügbar ist, ist es immer noch eine Herausforderung, die angewandten Techniken zu vergleichen und zu evaluieren.

Wesentliche Fortschritte in Bezug auf die Knochenheilung bei der aufklappenden HTO ergaben sich durch zwei technische Änderungen: den Einsatz einer besser geeigneten Operationstechnik sowie eine winkelstabile Fixation der Segmente, die trotz Rigidität eine heilungsfördernde Kallusmassage im Bereich des Osteotomiespalttes erlaubte. (Staubli und Jacob, 2010). Vor allem die biplanar durchgeführte, medial aufklappende Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie wurde in den letzten Jahren aufwendig und weiterentwickelt. Im Vergleich zu der früher verwendeten medial uniplanar aufklappenden HTO kommt zur schrägen Osteotomieführung der posterioren Tibia ein zweiter aufsteigender Schnitt unterhalb der Tuberositas tibiae hinzu. Dieser kann prinzipiell auch absteigend durchgeführt werden. Beide Techniken verbessern die Rotationsstabilität der Osteotomie und vermeiden einen sagittalen Korrekturverlust der Osteotomie-Ebenen (Pape et al., 2010).

Durch die Einführung von winkelstabilen Plattenfixateuren hat nicht nur bei aufklappenden biplanarer Operationstechnik, sondern auch bei einzeitigen mehrdimensionalen Korrekturosteotomien (Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003; Staubli et al., 2003) sowie bei Osteotomien mit größerer Keilbasishöhe (≤ 13 mm) (Lobenhoffer et al., 2004; Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003; Staubli et al., 2003) die Rate der Pseudarthrosenbildung abgenommen.

Dem lateralen Osteotomiescharnier wurde zunehmend Aufmerksamkeit geschenkt (Lit z.B.: Fractures around the lateral cortical hinge after a medial opening-wedge high tibial osteotomy: a new classification of lateral hinge fracture. Takeuchi R, Ishikawa H, Kumagai K, Yamaguchi Y, Chiba N, Akamatsu Y, Saito T. *Arthroscopy*. 2012 Jan;28(1):85-94. doi: 10.1016/j.arthro.2011.06.034. Epub 2011 Oct 7.). Insbesondere ein vorsichtiges operatives Vorgehen wie auch ein langsames und schrittweises Auf- oder Zuklappen sollte die Integrität der belassenen Kortikalis erhalten. Han et al. (Han et al., 2011) konnten für die medial aufklappende Technik zusätzlich nachweisen, dass das Risiko lateraler, kortikaler Frakturen sowie der darauf folgende Korrekturverlust signifikant reduziert werden kann, wenn sich die Osteotomieführung auf eine „sichere Zone“ begrenzt, im Vergleich zu einer Osteotomie, deren Ausrichtung tiefer ist. Die sichere Zone, in der eine mediale,

aufklappende HTO mit diesem minimalen Risiko durchgeführt werden kann, liegt zwischen der Spitze des Fibulaköpfchens und der Umfangslinie des Fibulaköpfchens. Die Vergleichszone liegt auf einem tieferen Osteotomielevel distal zur Umfangslinie des Fibulaköpfchens (Han et al., 2011).

Die reine mechanische Lehre, welche die Grundlage für die knöchernen Achskorrekturen darstellt, ist durch diese biologischen und biomechanischen Gesichtspunkte in den Hintergrund gedrängt worden. Die Korrektur sollte aus mechanischen Aspekten in der Umgebung der eigentlichen geometrischen Fehlstellung erfolgen. Dieser Punkt entspricht dem Drehzentrum der anatomischen Angulation und wird als CORA (Paley und Pfeil, 2000) bezeichnet. Je weiter das durchgeführte Realignment räumlich von der CORA entfernt ist, desto größer ist der unerwünschte translatorische anatomische Versatz, der zwischen dem proximalen und dem distalen Anteil des osteotomierten Röhrenknochens entsteht. Im klinischen Alltag finden sich die meisten nicht posttraumatischen Varusfehlstellungen der Tibia relativ weit proximal, so dass die Vernachlässigung der reinen mechanischen Lehre einen akzeptablen Kompromiss darstellt, der es erlaubt, mit gelenknahen und technisch einfacheren Operationsmethoden ebenfalls ein akzeptables Ergebnis zu erzielen. In Ausnahmefällen muss, bei entsprechender Relevanz des resultierenden anatomischen Versatzes, von den in dieser Arbeit untersuchten Routineosteotomien abgesehen werden und diaphysär korrigiert werden.

Summarisch zielen alle technischen Modifikationen darauf, eine schnelle Knochenheilung zu fördern. Eine stabile Osteosynthese ermöglicht eine frühe Mobilisierung und vermeidet Korrekturverluste sowie Pseudoarthrose (Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003).

Ziel einer Varisierungsosteotomie des distalen Femurs (DFO) ist die Verschiebung der mechanischen Traglinie nach medial. Hierbei gilt es, in Patienten mit valgischer Beinachse ohne höhergradige Knorpelläsion eine neutrale Traglinie durch die 50%-Linie des Tibiakopfes zu erreichen. Eine minimale Überkorrektur mit der postoperativen mechanischen Tragachse durch den medialen Eminentiahöcker, ist bei lateraler Arthrose und Valgusmorphologie anzustreben (Freiling et al., 2010). Pathomorphologisch bedingt hat die distale

Femurosteotomie zur Korrektur einer Valgusfehlstellung im Femur eine bedeutende Schwachstelle. Die knöchernerne Korrektur erzielt einen zweidimensionalen Effekt im Sinne einer Varisierung in der Frontalebene. Mit zunehmender Flexion im Kniegelenk geht die Tibia aber aus dieser Korrekturebene heraus und die transversale Morphologie der dorsalen Kondylen wird wichtig. Eine Fehlstellung im Femur ist oft eine intraartikuläre Fehlstellung im Sinne einer hypotrophen lateralen Femurkondyle. Diese Hypotrophie betrifft die gesamte laterale Femurkondyle und somit auch den dorsalen Aspekt. Wollte man die Valgusachse bei zunehmender Flexion durch eine distale Femur Korrekturosteotomie beeinflussen müsste man frontal varisieren und transversal nach innen rotieren. Hierdurch würde jedoch auch das femoropatellare Gleitlager nach innen rotiert werden. Es würde also durch die Korrektur eines femorotibialen axialen Malalignments eine femoropatellare Fehlrotation verursacht werden. Zur Vermeidung solcher sekundären Fehlstellungen erfolgt die Korrektur des Genu valgums deshalb femoral meist nur in der Frontalebene. Eine umschriebene Valgusgonarthrose bei intakten Kreuzbändern wirkt sich jedoch vor allem ab 45° Flexion aus. Auch andere laterale Gelenkschäden, wie ein ausgedehnter Außenmeniskusschaden, werden bei intraartikulärer Fehlstellung in Beugung durch die Außenrotation der Tibia und einem funktionell resultierenden Valgusstress unter erhöhte Belastung gebracht. Die lateralen monokompartimentellen Gelenkschäden können deshalb mit einer DFO nur als Kompromiss angegangen werden. Prinzipiell sind die Indikationen dieselben wie für die HTO nur auf das laterale Gelenkkompartiment bezogen. Von präventiven Eingriffen bei hypotropher lateraler Femurkondyle sollte aus gegebenen pathomorphologischen Gründen abgesehen werden. Anders verhält es sich bei den selteneren extraartikulären Fehlstellungen, welche sich ggf. auch durch CORA nahe Osteotomien vollständig korrigieren lassen.

Die DFO kann prinzipiell medial aufklappend, lateral zuklappend oder auch als „focal-dome“ Osteotomie durchgeführt werden, um eine neutrale oder minimal varische mechanische Beinachse zu erzeugen (Freiling et al., 2008; Puddu et al., 2007; van Heerwaarden et al., 2007b).

Auch für die DFO hat es in den letzten Jahren wesentliche technische Fortschritte gegeben. Neben den etablierten medial uniplanar schließenden und lateral öffnenden Techniken wurde jüngstens die medial biplanar schließende DFO vorgestellt und weiterentwickelt. Die Osteotomietechnik inklusive ihrer Ausrichtung und Lokalisation zeigte eine wichtige Rolle, um die primäre Stabilität zu verbessern. Außer der deutlichen Zunahme der sagittalen und rotatorischen Stabilität, insbesondere durch die medial schließende biplanare Osteotomietechnik, zeigten sich im Detail weitere biomechanisch wichtige technische Faktoren. Eine unvollständige, medial schließende Osteotomie mit einer intakten lateralen knöchernen Überbrückung ist weit stabiler als eine komplette Osteotomie mit durchtrennter lateraler Kortikalis (Puddu et al., 2007; van Heerwaarden et al., 2007b). Schräg von proximal nach distal absteigende Osteotomien sind stabiler als quer verlaufende Osteotomien (van Heerwaarden et al., 2007a). Dieser Effekt entsteht, da nur bei orthograd zur medialen Kortikalis verlaufender Subtraktionsosteotomie kongruente Osteotomieflächen entstehen, welche unter Kompression einen Formschluss mit Kortikalis auf Kortikalis ermöglichen.

In der HTO wurde der biplanare Schnitt bevorzugt im Vergleich zur uniplanaren Technik, um die primäre Stabilität zu erhöhen. Das gleiche Argument gilt insbesondere auch für die DFO. Ein wesentlicher Unterschied der biplanaren zur uniplanaren Schnitttechniken ist aber auch, dass die trochleare Gelenkfläche umgangen werden kann (van Heerwaarden et al., 2008). Uniplanare Schnitttechniken müssen proximal der Trochlea beginnen und enden, um eine Verletzung am Patellofemuralgelenk zu vermeiden. Die horizontalen Schnitte der biplanaren Technik können distaler in die Metaphyse positioniert werden. Aus mechanischer Perspektive wird dem bei Genu valgum oft intraartikulär liegendem Ort der Fehlstellung besser Rechnung getragen.

Die Stabilisierung der Osteotomie kann grundsätzlich mit konventionellen Platten oder einem distalen Femurnagel erfolgen. Bei einer supracondylären femoralen Osteotomie ist eine stabile Osteosynthese noch bedeutender als bei der HTO. In biomechanischen Untersuchungen konnten wesentliche Differenzen der unterschiedlichen Fixationsmethoden für die primäre Stabilität festgestellt werden (Brinkman et al., 2011a). Biomechanisch und klinisch werden die besten Ergebnisse mit Klingenplatten und winkelstabilen internen

Schraubenfixateuren erreicht. In den letzten Jahren hat die aufklappende Osteotomie mittels lateralem Zugang aufgrund der Entwicklung von Distanzplatten verstärkte Akzeptanz erhalten. Freiling et al. (Freiling et al., 2008) konnten jedoch beobachten, dass diese Technik zu einer gestörten Knochenheilung führen kann. Diese Technik wird als Folge bereits von vielen Arbeitsgruppen wieder verlassen.

Die varisierende suprakondyläre Femurosteotomie wird heute im Allgemeinen als medial schließende Osteotomie durchgeführt. Ebenso wie bei der HTO haben sich seit der Einführung der neuen winkelstabilen Platten die Operationstechniken weiterentwickelt, die funktionelle Rehabilitation verbessert und die Zeit der Knochenheilung verkürzt (Freiling et al., 2010). Insbesondere hat die Evolution der medial schließenden zur biplanaren Operationstechnik in Kombination mit dem Einsatz moderner winkelstabiler Fixationsvorrichtungen zur Förderung der Osteogenese und zu reproduzierbaren intraoperativen Ergebnissen sowie komplikationsarmen Abheilungen geführt (Brinkman et al., 2011b; Freiling et al., 2010).

2.2 Zielsetzung der Studie

Die Veränderungen der Osteotomietechniken am distalen Femur und an der proximalen Tibia basierten vor allem auf biomechanischen Vorstellungen, führten aber auch zu bedeutenden geometrischen Modifikationen. Bei allen Operationstechniken ist zu beachten, dass die Schnelligkeit der Knochenheilung individuell sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und von mehreren Faktoren abhängt, die im Voraus nicht sicher eingeschätzt werden können. Im Gegensatz dazu sind biomechanische und geometrische Effekte, welche ebenfalls die Konsolidierungsquoten beeinflussen könnten, mess- und reproduzierbar (Pape et al., 2012; van Heerwaarden et al., 2012). Die geometrischen Differenzen zwischen den Techniken und deren Bedeutung wurden jedoch bisher nicht näher betrachtet (Han et al., 2011; Iorio et al., 2011; Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003; Pape et al., 2011).

Genauere Daten in Abhängigkeit von den verschiedenen HTO- und DFO-Operationstechniken lagen bisher weder über die knöchernen Schnittflächen, noch über die Keilvolumina oder die knöchernen Kontaktflächen vor. Zielsetzung dieser Arbeit ist, die knöchernen Schnittflächen und Keilvolumina der unterschiedlichen Operationstechniken zu messen und die sich daraus ergebenden geometrischen Unterschiede zu untersuchen. Knochenbiologisch ist anzunehmen, dass die kleinstmögliche Keilgröße durch Reduzierung der langsamen sekundären Knochenheilung ein guter Parameter für eine komplikationsarme Osteotomieabheilung bietet. Eine größtmögliche Knochenschnittfläche kann die Knochenheilung aufgrund vermehrter Spongiosamasse zusätzlich vorantreiben und ermöglicht grössere Kontaktzonen für primäre Knochenheilung.

Wir stellen die Hypothese auf, dass die biplanaren Techniken die größere Knochenoberfläche erzeugen als die monoplanaren Techniken. Des Weiteren wird angenommen, dass bezüglich der öffnenden Techniken eine biplanare Durchführung ein kleineres Keilvolumen als eine monoplanare erzeugt. Daraus würde sich ergeben, dass die biplanaren Operationstechniken der HTO sowie der DFO, die eine große spongiöse Schnittfläche mit einem kleinen Keilvolumen kombinieren, besser als uniplanare Techniken den idealen geometrischen Anforderungen der Knochenheilung entsprechen.

In dieser Studie wurde die knöchernen Geometrie der Osteotomieschnitte in Abhängigkeit zu den chirurgischen Techniken quantifiziert. Die vier am häufigsten angenommenen durchgeführten Methoden für die DFO und die HTO wurden untersucht. Inkludiert waren verschiedene uniplanare und biplanare Schnittführungen mit teils aufklappendem (öffnendem) und teils zuklappendem (schließendem) Korrekturmechanismus. Die entstehenden Knochenoberflächen inklusive(?) sowie die Keilvolumina wurden quantifiziert.

3. Material und Methodik

3.1 Gruppenverteilung - Proximale tibiale valgierende Osteotomien

Den vier HTO-Gruppen

- Gruppe HTO 1: medial aufklappende uniplanare Technik;
- Gruppe HTO 2: medial aufklappende biplanare Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie;
- Gruppe HTO 3: medial aufklappende biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie;
- Gruppe HTO 4: lateral zuklappende uniplanare Technik;

wurden je fünf der insgesamt 20 Tibia-Substitute zugeordnet. Verwendet wurde Modell Nr. 1172, rechte Tibia, 10o Varusfehlstellung des Tibiakopfes, von Synbone, Malans, Schweiz.

3.2 Standards der operativen HTO Techniken

Die angewandten operativen Techniken wurden entsprechend veröffentlichter Richtlinien nach allgemeinen Standards (Fowler et al., 2000; Gaasbeek et al., 2004; Hofmann et al., 1991; Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003) durchgeführt. Wesentliche Unterschiede zwischen den chirurgischen Techniken der 4 HTO Gruppen sind in der Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Bei allen biplanaren Osteotomien wurde eine horizontale Osteotomieführung kombiniert mit einem aufsteigenden oder absteigenden vertikalen Schnitt dorsal der Tuberositas tibiae angewendet. In Gruppe HTO 2 (n = 5) erfolgte die biplanare Osteotomie in der Frontalebene auf klassische Art aufsteigend und V-förmig, wobei die Tuberositas tibiae aufsteigend in einem 110o-Winkel zur Horizontalebene hinterschnitten wurde (Pape et al., 2010).

In Gruppe HTO 3 (n = 5) verlief der V-förmige Teil des biplanaren Schnittes absteigend in einem 110°-Winkel zur Horizontalebene (Gaasbeek et al., 2004). In Gruppe HTO 4 wurde die lateral zuklappende HTO nach Hofman et al. (Hofmann et al., 1991) mit Hilfe einer kalibrierten Sägelehre durchgeführt (vgl. Abb. 3.2e). Tabelle 3.2 zeigt einen Überblick der unterschiedlichen Merkmale der Operationstechniken, die in den vier Gruppen zur Anwendung kamen.

3.2.1 Medial uniplanar aufklappende HTO Technik (Gruppe HTO 1)

In der Gruppe HTO 1 wird eine medial uniplanar aufklappende Technik angewandt (Abb. 3.2.1). Zur exakten Ausführung der horizontalen Osteotomie werden zwei K-Drähte exakt parallel zueinander von medial nach lateral im Verlauf des geplanten Sägeschnitts gesetzt. Der Ausgangspunkt liegt an der medialen Kortex 3 cm distal der Gelenklinie. Der Schlusspunkt des Sägeschnitts ist 2 cm distal der lateralen Gelenklinie und 5 mm kurz zum lateralen Kortex. Der leicht schräge transversale Schnitt erfolgt genau distal von und entlang der K-Drähte und steigt nach lateral an. In der ap Ausrichtung ist er parallel zur Gelenklinie.

Die uniplanare Durchführung beinhaltet sowohl die dorsale als auch die ventrale Kortikalis.

In Bezug auf die Patellasehne liegt die Osteotomie proximal derer distalen Insertion und somit innerhalb deren Verlaufs.

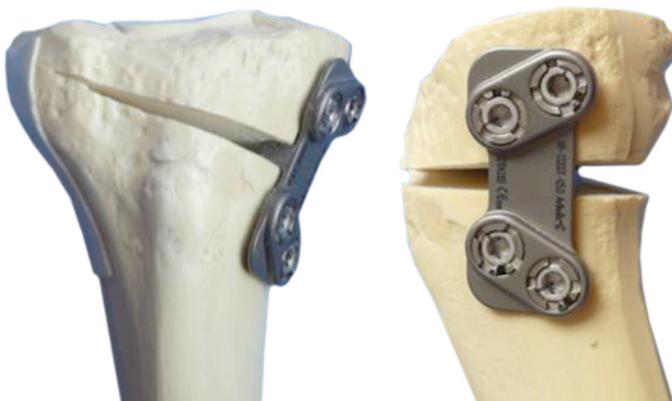


Abbildung 3.2.1: Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial uniplanar aufklappende HTO Technik (Gruppe HTO 1) in frontaler (links) und medialer (rechts) Aufsicht.

3.2.2 Medial biplanar aufklappende HTO Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie

(Gruppe HTO 2)

Zur Durchführung der medial biplanar aufklappenden HTO mit aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2) (Abb. 3.2.2) erfolgt ebenfalls das Setzen zweier zueinander paralleler K-Drähte von medial nach lateral im Verlauf des geplanten transversalen Sägeschnitts. Der Ausgangspunkt für die horizontale Osteotomie liegt an der medialen Kortex 4 cm distal der Gelenklinie. Der Schlusspunkt des Sägeschnitts ist 1,5 cm distal der lateralen Gelenklinie und 5mm kurz zum lateralen Kortex. Der schräge transversale Schnitt der horizontalen Osteotomie erfolgt genau distal von und entlang der K-Drähte und steigt nach lateral an. In der ap Ausrichtung ist er parallel zur Gelenklinie. Die dorsale Kortikalis wird hierbei osteotomiert. Die Osteotomie liegt distal der Patellasehne auf Höhe der proximalen Tuberositas tibiae und somit extraligamentär. Die Tuberositas wird nicht in den schräg-transversalen Schnitt eingefasst. Hierzu wird ventral eine 1cm starke Knochenbrücke belassen.

Ein zweiter nun schräg coronar ausgerichteter Schnitt als vertikale Osteotomie setzt auf Höhe des transversalen Schnitts 1 cm dorsal zur ventralen Kortikalis der Tuberositas tibiae an und unterschneidet selbige nach proximal aufsteigend. Im Verhältnis zu der horizontalen Osteotomie verläuft er in einem 110° Winkel nach proximo-ventral auslaufend. Diese vertikale Osteotomie beinhaltet die mediale wie auch die laterale Kortikalis (Pape et al., 2010) und steigt ca. 2 bis 3 cm an bis sie just proximal der Tuberositas tibiae die ventrale Kortikalis durchtrennt.



Abbildung 3.2.2: Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial biplanar aufklappende HTO Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2) in frontaler (links) und medialer (rechts) Aufsicht.

3.2.3 Medial biplanar aufklappende HTO Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie

(Gruppe HTO 3)

Die von Gaasbeek (Gaasbeek et al., 2004) entwickelte Operationsmethode (Gruppe HTO 3) der medialen biplanaren aufklappenden Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie (Abb. 3.2.3) wird bezüglich der horizontalen Osteotomie exakt wie die oben beschriebene medial öffnende biplanare Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie ausgeführt. Die schräg coronar ausgerichtete vertikale Osteotomie setzt auf Höhe des transversalen Schnitts 1 cm dorsal zur ventralen Kortikalis Tuberositas tibiae an und unterschneidet selbige nach distal absteigend. Im Verhältnis zu der horizontalen Osteotomie verläuft er in einem 110° Winkel nach distal-ventral auslaufend. Diese zweite Osteotomie beinhaltet die mediale wie auch die laterale Kortikalis (Gaasbeek et al., 2004) und verläuft ca. 3 bis 5 cm nach distal bis sie just caudal der Tuberositas tibiae die ventrale Kortikalis durchtrennt.



Abbildung 3.2.3: Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial biplanar aufklappender HTO Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 3) in frontaler (links) und medialer (rechts) Aufsicht.

3.2.4 Lateral uniplanar zuklappende HTO Technik (Gruppe HTO 4)

In der Gruppe HTO 4 wurde die lateral zuklappende uniplanare HTO (Abb. 3.2.4.1) unter Anwendung einer kalibrierten Sägeblatt-Schlitzführung (Abb. 3.2.4.2) durchgeführt. In 2° Schritten für die Doppelosteotomie ist hiermit eine, bis zu 10°ige Korrektur vorgesehen. Mit Hilfe von radiär ausgerichteten Schlitzten kann in der von

Hofmann et al. (Hofmann et al., 1991) beschriebenen Technik eine präzise Keilresektion erfolgen. Der Ausgangspunkt liegt an der lateralen Kortex 2 cm distal der Gelenklinie. Der Schlusspunkt des Sägeschnitts ist 2 cm distal der medialen Gelenklinie und 5mm kurz zur medialen Kortex. Der proximale transversale Schnitt der horizontalen Osteotomie erfolgt streng horizontal. Die Sägeblatt-Schlitzführung wird in den proximalen Schnitt eingeführt. Ein zweiter distaler schräg-horizontaler Schnitt durch die radiär angeordnete Schlitzführungen vervollständigt die keilförmige Doppelosteotomie. Der Endpunkt der beiden Osteotomien ist derselbe. Beide Osteotomien inkludieren die laterale, dorsale und ventrale Kortikalis. Der Knochenkeil wird entfernt. In Bezug auf die Patellasehne liegt die uniplanare Doppelosteotomie auf Höhe deren distalen Verlaufs und somit intraligamentär.



Abbildung 3.2.1: Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit lateral uniplanar zuklappender HTO Technik (Gruppe HTO 4) in frontaler (links) und lateraler (rechts) Aufsicht.



Abbildung 3.2.4.2: Bei Gruppe HTO 4 wurde intraoperativ eine kalibrierte Sägelehre mit 2o-Schritten verwendet, um das zuklappende Verfahren zu standardisieren.

Tabelle 3.2	Gruppe HTO 1	Gruppe HTO 2	Gruppe HTO 3	Gruppe HTO 4
Operative Unterschiede	aufklappend uniplanar	aufklappend biplanar aufsteigend	aufklappend biplanar absteigend	zuklappend uniplanar
Horizontale Osteotomie zum Lig. Patellae	intragamentär	extraligamentär	extraligamentär	intragamentär
Horizontale Osteotomieebene				
Startpunkt	med. Kortikalis 3 cm distal der Gelenklinie	med. Kortikalis 4 cm distal der Gelenklinie	med. Kortikalis 4 cm distal der Gelenklinie	lat. Kortikalis 2 cm distal der Gelenklinie
Endpunkt	2 cm distal der lat. Gelenklinie	1,5 cm distal der lat. Gelenklinie	1,5 cm distal der lat. Gelenklinie	2 cm distal der med. Gelenklinie
	5 mm von der Gegenkortikalis entfernt			
Ausrichtung	leicht schräg und aufsteigend	leicht schräg und aufsteigend	leicht schräg und aufsteigend	strikt horizontal
Instrumentarium	2 K-Drähte	2 K-Drähte	2 K-Drähte	kalibrierte Sägelehre
Frontale Osteotomieebene				
Startpunkt		1 cm dorsal zur Tub. tibiae	1 cm dorsal zur Tub. tibiae	
Endpunkt		Gegenkortikalis	Gegenkortikalis	
Ausrichtung		Aufsteigend im 110°-Winkel zur horizont. Ebene	Aufsteigend im 110°-Winkel zur horizont. Ebene	

Tabelle 3.2: Anatomische Merkmale zur Standardisierung der angewendeten Operationstechniken für tibiale

Valgisierungsosteotomien (HTO) (Quelle: eigene Darstellung)

3.3 Gruppenverteilung - Distale femorale varisierende Osteotomien

Den vier DFO-Gruppen

Gruppe DFO 1: lateral uniplanar aufklappend

Gruppe DFO 2: medial uniplanar zuklappend

Gruppe DFO 3: lateral biplanar aufklappend

Gruppe DFO 4: medial biplanar zuklappend

wurden insgesamt 20 Femur-Substitute zugeordnet. Verwendet wurde Modell 1272, rechter Femur mit einer distalen Valgusfehlstellung von 10° (Synbone, Malans, Schweiz).

3.4 Standards der operativen DFO Techniken

Identisch zu den vier HTO Gruppen wurden die angewandten operativen DFO Techniken in standardisierter Form entsprechend veröffentlichter chirurgischer Richtlinien (Brinkman et al., 2011b; Brinkman et al., 2012; Freiling et al., 2010; Puddu et al., 2007; van Heerwaarden et al., 2007b) durchgeführt. Eine Ausnahme gilt für die biplanare, laterale, aufklappende Technik für die bisher keine Veröffentlichung verfügbar ist. Selbige wurde in strenger Anlehnung an die uns überlieferte Technik von R. van Heerwaarden durchgeführt. R. van Heerwaarden ist unserer Kenntnis nach der Entwickler und Erstdurchführer der biplanaren, lateral aufklappenden Technik der DFO. Wesentliche Unterschiede zwischen den chirurgischen Techniken der 4 DFO Gruppen sind in der Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Alle Knochen wurden in einer Säge- und Haltevorrichtung montiert für eine reproduzierbare Platzierung der Höhe und Ausrichtung der Säge für die schräg absteigenden Schnitte (Brinkman et al., 2011b) der horizontalen Osteotomien. Die Eintrittspunkte der Sägeschnitte wurden auf dem Knochen angezeichnet und ein K-Draht

unter visueller Kontrolle in anteroposteriorer Richtung als Endpunkt eingebracht (In Patienten wird der K-Draht unter Bildwandlerkontrolle eingebracht).

3.4.1 Lateral uniplanar aufklappende DFO Technik (Gruppe DFO 1)

In der Gruppe DFO 1 wurde eine lateral aufklappende uniplanare Osteotomietechnik (Abb. 3.4.1.1 und Abb. 3.4.1.2) durchgeführt. Zur exakten Ausführung wurden die Eintritts- und Endpunkte der Sägeschnitte proximal zur Trochlea-Umgebung positioniert. Der Eintrittspunkt lag am lateralen Kortex 5,5 cm proximal der Gelenklinie. Der vom K-Draht markierte Endpunkt des leicht nach medial absteigenden transversalen Schnittes der horizontalen Osteotomie lag 5 cm proximal der medialen Gelenklinie und 5 mm kurz zur medialen Kortikalis. Unter vorsichtiger Aufdehnung der untangierten medialen Kortikalis erfolgte die erwünschte Achskorrektur durch Öffnen der Osteotomie.



Abbildung 3.4.1.1: Rechter Femur mit uniplanarer horizontaler Osteotomie vor lateralem Öffnen (Gruppe DFO 1) in frontaler Aufsicht.



Abbildung 3.4.1.2: Rechter Femur variierend umgestellt mit lateral uniplanar aufklappender DFO Technik (Gruppe DFO 1) in frontaler (links) und lateraler (rechts) Aufsicht.

3.4.2 Medial uniplanar zuklappende DFO Technik (Gruppe DFO 2)

Bei der medial zuklappenden uniplanaren Osteotomietechnik (Abb. 3.4.2) (Gruppe DFO 2) wurden die Eintritts- und Endpunkte der Sägeschnitte ebenfalls proximal zur Trochlea-Umgebung positioniert.

Der Eintrittspunkt lag am medialen Kortex 6 cm proximal der Gelenklinie.

Der vom K-Draht markierte Endpunkte des leicht nach lateral absteigenden transversalen Schnitts der horizontalen Osteotomie lag 5 cm proximal der lateralen Gelenklinie und 5 mm kurz zur lateralen Kortikalis.

Eine zweite horizontale Osteotomie wurde entsprechend der erwünschten Korrektur angezeichnet. Der Eintrittspunkt lag proximal der ersten Osteotomie. Der Endpunkt war identisch. Die Doppelosteotomie

inkludierte je die mediale, dorsale und ventrale Femurkortikalis. Nach Entfernung des resultierenden

Knochenkeils erfolgte durch sanfte axiale Kompression das Schließen der Osteotomie, ohne die erhaltende laterale Kortikalis vollständig zu destabilisieren.



Abbildung 3.4.2: Rechter Femur mit Anzeichnung einer 5 mm, 10 mm und 15 mm uniplanaren horizontalen Doppelosteotomie von medial (Gruppe DFO 2) in dorsaler Aufsicht.

3.4.3 Lateral biplanar aufklappende DFO Technik (Gruppe DFO 3)

Bei der lateral aufklappenden biplanaren DFO Osteotomietechnik (Abb. 3.4.3.1 und 3.4.3.2) (Gruppe DFO 3) wurden die Eintritts- und Endpunkte der Sägeschnitte dorsal und auf Höhe der Trochlea positioniert. Im Vergleich zu den uniplanaren Techniken wurden diese 0,5 cm tiefer und nur in den posterioren drei Vierteln des Femurs angebracht. Das anteriore Viertel und somit die Trochlea wurden ausgespart. Der Eintrittspunkt lag somit am lateralen Kortex 5 cm proximal der Gelenklinie.

Der vom K-Draht markierte Endpunkte des leicht nach medial absteigenden transversalen Schnitts der horizontalen Osteotomie lag 4,5 cm proximal der medialen Gelenklinie und 5 mm kurz zur medialen Kortikalis. Ein zweiter, im 90o-Winkel zur horizontalen Osteotomie ansteigender und parallel zum posterioren Femurrand verlaufender, coronarer Sägeschnitt vervollständigte die biplanare Osteotomie. Diese vertikale Osteotomie von lateral beinhaltete die laterale und mediale Kortikalis und lief nach proximal durch die ventrale Kortikalis aus. Unter vorsichtiger Aufdehnung der untangierten medialen Kortikalis erfolgte die erwünschte Achskorrektur durch Öffnen der Osteotomie.



Abbildung 3.4.3.1: Gruppe DFO, biplanar, lateral, aufklappend (laterale Sicht vor dem Aufklappen)



Abbildung 3.4.3.2: Rechter Femur variierend umgestellt mit lateral biplanar aufklappenden DFO Technik (Gruppe DFO 3) in antero-lateraler (links) und lateraler (rechts) Aufsicht.

3.4.4 Medial biplanar zuklappende DFO Technik (Gruppe DFO 4)

Bei der medial zuklappenden biplanaren Osteotomietechnik (Abb. 3.4.4) (Gruppe DFO 4) wurden die Eintritts- und Endpunkte der Sägeschnitte dorsal und auf Höhe der Trochlea positioniert. Im Vergleich zu den uniplanaren Techniken wurden diese ebenfalls 0,5 cm tiefer und nur in den posterioren drei Vierteln des Femurs angebracht. Das anteriore Viertel und somit die Trochlea wurden ausgespart. Der Eintrittspunkt lag somit am medialen Kortex 5,5 cm proximal der Gelenklinie. Der vom K-Draht markierte Endpunkt des leicht nach lateral absteigenden transversalen Schnitts der horizontalen Osteotomie lag 4,5 cm proximal der lateralen

Gelenklinie und 5 mm kurz zur lateralen Kortikalis. Der zweite Schnitt der horizontalen Doppelosteotomie wurde mit der jeweils geplanten Keilbasishöhe angezeichnet. Der Endpunkt war wiederum der gleiche wie für den ersten schräg-transversalen Schnitt. Ein dritter, im 90°-Winkel zur horizontalen Osteotomie (Freiling et al., 2010) ansteigender und parallel zum posterioren Femurrand verlaufender, vertikaler Sägeschnitt vervollständigte die biplanare Osteotomie. Dieser von medial durchgeführte coronare Schnitt der vertikalen Osteotomie beinhaltete die mediale und laterale Kortikalis und lief nach proximal durch die ventrale Kortikalis aus. Die knöchernen Schnitte starteten mit einer posterioren, unvollständigen Osteotomie, danach folgte ein anteriorer biplanarer Schnitt. Nachdem die Osteotomie mit drei knöchernen Schnitten beendet war, wurde der resultierende Knochenkeil entfernt. Das Schließen der Osteotomie erfolgte unter vorsichtigem axialem Druck zur weitestgehenden Erhaltung der Integrität der lateralen Kortikalis.



Abbildung 3.4.4: Rechter Femur mit Anzeichnung einer 5 mm, 10 mm und 15 mm uniplanaren horizontalen Doppelosteotomie von medial (Gruppe DFO 4). Anteriore Aufsicht (links) und medialer Aufsicht (rechts) nach 5 mm Doppelosteotomie, Entfernung des Knochenkeils und Schließen des Osteotomiespalts.

Tabelle 3.4	Gruppe DFO 1	Gruppe DFO 2	Gruppe DFO 3	Gruppe DFO 4
Operative Unterschiede	lateral uniplanar aufklappend	medial uniplanar zuklappend	lateral biplanar aufklappend	medial biplanar zuklappend
Horizontale Osteotomie zur Trochlea	proximal	proximal	dorsal	dorsal
Horizontale Osteotomieebene				
Startpunkt	lat. Kortikalis 5,5 cm proximal der Gelenklinie	med. Kortikalis 6 cm proximal der Gelenklinie	lat. Kortikalis 5 cm proximal der Gelenklinie	med. Kortikalis 5,5 cm proximal der Gelenklinie
Endpunkt	5 cm proximal d. der medialen Gelenklinie	5 cm proximal d. der lateralen Gelenklinie	4,5 cm proximal der medialen Gelenklinie	4,5 cm proximal der lateralen Gelenklinie
5 mm von der Gegenkortikalis entfernt				
Ausrichtung	leicht schräg und absteigend	leicht schräg und absteigend	leicht schräg und absteigend	leicht schräg und absteigend
Frontale Osteotomieebene				
Startpunkt			¼ dorsal zum anterioren Femur	¼ dorsal zum anterioren Femur
Endpunkt			Durchtrennung d. Gegenkortikalis	Durchtrennung d. Gegenkortikalis
Ausrichtung			Aufsteigend im 90°-Winkel zur horizont. Ebene	Aufsteigend im 90°-Winkel zur horizont. Ebene

Tabelle 3.4: Anatomische Merkmale zur Standardisierung der angewandten Techniken für femorale Varisierungsosteotomien

(DFO) (Quelle: eigene Darstellung)

3.5 Kennzeichnung und Quantifizierung der Osteotomieflächen

Alle Osteotomieflächen der HTO (Abb. 3.5.1) und DFO (Abb. 3.5.2) Gruppen wurden wie folgt gekennzeichnet:

Horizontale Flächen mit A = proximal und horizontal. B = distal und horizontal sowie frontale Flächen, falls vorhanden. C = ventral und vertikal. D = dorsal und vertikal.

Die Schnittflächen wurden ermittelt, indem die Knochenränder auf einem Konturenpapier, das die Osteotomieebenen bedeckte, eingekreist wurden. Bei den uniplanaren Osteotomie-Proben entfielen die vertikalen Flächen C und D (Gruppe HTO 1, Gruppe HTO 4, Gruppe DFO 1 und Gruppe DFO 2).

Alle Osteotomieflächen wurden digital fotografiert. Jede Probe erhielt einen Anhänger mit der Maßeinteilung des Osteotomie-Niveaus. Mit Hilfe computergestützter Bildauswertung wurden Bilder sämtlicher Osteotomieebenen angefertigt. Nach erfolgreicher Kalibrierung aller Maßeinteilungen wurden die Knochenflächen aller Osteotomieebenen durch das bildgebende Softwareprogramm „analySIS“ (Olympus, Hamburg, Deutschland) in Quadratmillimetern quantifiziert. Zur exakten Berechnung wurde der t-Test an einer Stichprobe durchgeführt. Der Genauigkeitswert P war 0,173 in der HTO und 0,168 in der DFO Untersuchungsserie, womit keine Differenz zwischen dem Stichprobenmittel und dem spezifischen Wert festgestellt werden konnte. Die Retest-Reliabilität wurde mittels Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet (r). Wiederholte 10-Tage-Reliabilität-Tests für jede Osteotomieebene bestätigten mit $P < 0,01$ und $r = 0,90$ eine hohe Reliabilität zwischen Zeitpunkt 1 und 2, womit eine hohe Korrelation nachgewiesen werden konnte.

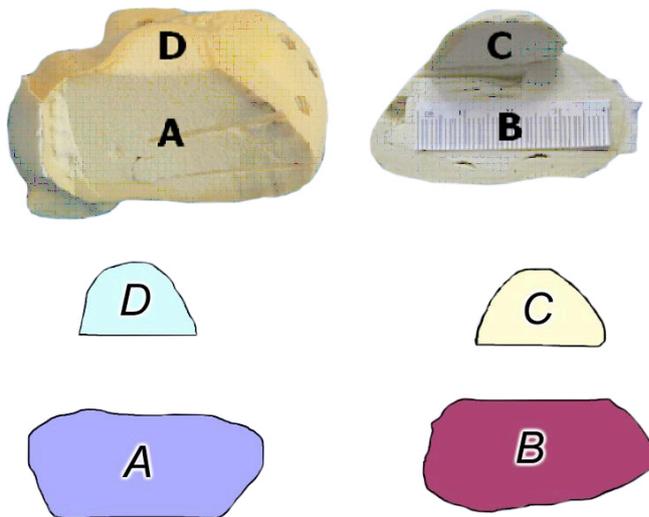
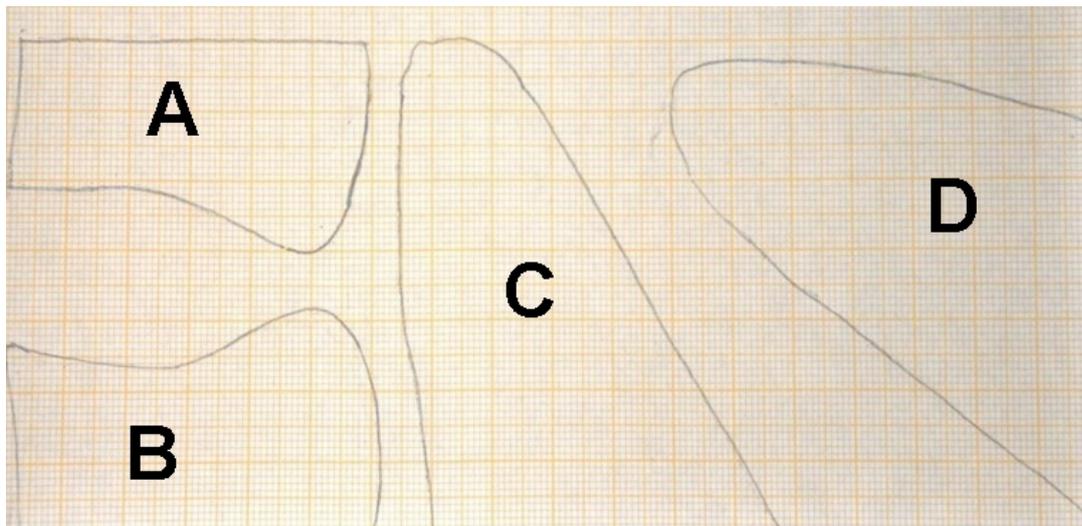


Abbildung 3.5.1: Flächen bei aufklappender biplanarer HTO in aufsteigender, V-förmiger Schnittführung im 110o-Winkel. Alle Osteotomieflächen wurden wie folgt gekennzeichnet: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal. Die Schnittflächen wurden ermittelt, indem die Knochenränder auf einem Konturenpapier, das die Osteotomieebenen bedeckte, eingekreist wurden. Bei den uniplanaren Osteotomie-Proben entfielen die vertikalen Flächen C und D (Gruppen HTO 1 und HTO 4).



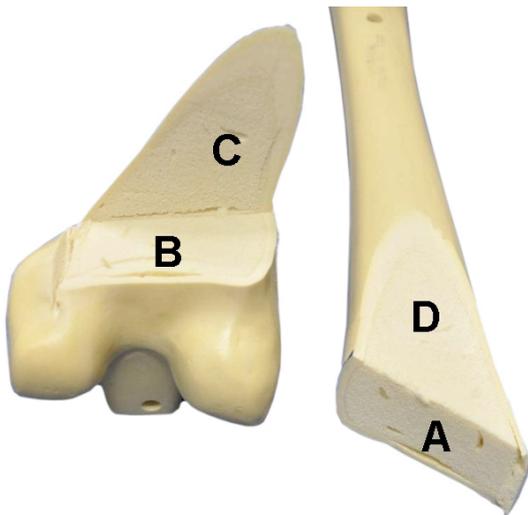


Abbildung 3.5.2: Flächen bei lateral aufklappende und medial schließende Osteotomie, uni- und biplanar. Alle Osteotomieebenen wurden wie folgt gekennzeichnet: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal. Die Schnittflächen wurden ermittelt, indem die Knochenränder auf einem Konturenpapier, das die Osteotomieebenen bedeckte, eingekreist wurden. Bei den uniplanaren Osteotomieproben (Gruppen DFO 1 und DFO 2) entfielen die frontalen Oberflächen.

3.6 Berechnung der Keilvolumen

Um das Keilvolumen annähernd abzuschätzen, wurde die Formel für die Prismavolumenberechnung genutzt:

$$\text{Keilvolumen} = \text{Prismavolumen} \times 0,5$$

$$\text{Keilvolumen} = (\text{Knochenflächen A} + \text{B}) \times 0,5 \times \text{Keilhöhe} \times 0,5$$

Diese Berechnung diente als Näherungswert, um die prozentualen Unterschiede der Keilvolumen bei den vier verschiedenen Osteotomieformen zu quantifizieren. Auf der Grundlage klinischer Relevanz wurden Keilhöhen von 5, 10 und 15 mm für die Volumenberechnung aller Proben ausgewählt. Das Prismavolumen wurde aus Grundfläche multipliziert mit der Keilhöhe errechnet. Als Grundfläche wurde die Quersumme der beiden Osteotomieflächen A und B verwendet. Das resultierende Prismavolumen wurde halbiert, um in Annäherung einen realistischen Wert für das Keilvolumen zu erhalten.

3.7 Statistische Auswertung

Ausgehend von einer vorangegangenen Teststärkenanalyse (Teststärke 80 %, Signifikanzlevel 5 %), wurde die statistische Auswertung anhand der Daten vorgenommen, die von den fünf Stichproben pro Gruppe geliefert wurden. Für die statistische Auswertung wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholungen angewendet, um die Oberflächen in Quadratmillimetern (mm²) und die in Kubikmillimetern (mm³) berechneten Keilvolumen zwischen den Gruppen miteinander zu vergleichen. Dabei wurden Differenzen mit $P < 0,05$ als signifikant betrachtet.

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der HTO-Techniken

4.1.1 Oberflächen der unterschiedlichen Tibiaebenen

Da für alle knöchernen Schnitte ein 1,5 mm dickes Sägeblatt verwendet wurde, waren nach der Schnitfführung die entsprechenden Tibiaebenen nicht völlig kongruent (vgl. Abbildung 4.1.1 und Tabelle 4.1.1). In allen Sawbones hatte die proximale horizontale Ebene (Osteotomieebene A) eine etwas größere Fläche im Vergleich zu der distalen Ebene (Osteotomieebene B). Die Osteotomieebenen A hatten einen mittleren Wert von 20,6 cm² (SD 2,6), die Osteotomieebenen B einen mittleren Wert von 19,4 cm², SD 2,4). Die dorsalen frontalen Ebenen (Osteotomieebene D) waren ebenfalls gekennzeichnet von etwas größeren Oberflächen im Vergleich zu ihren ventralen Gegenstücken (Osteotomieebene C). Die Osteotomieebenen D hatten einen Mittelwert von 7,2 cm² (STDEV 3,1; SD 2,9), die Osteotomieebenen C einen mittleren Wert von 6,0 cm² (STDEV 2,2; SD 1,7).

Die gesamten Knochenoberflächen, die durch die verschiedenen Osteotomietechniken entstanden sind, werden in Tabelle 4.1.1 aufgelistet und in Abbildung 4.1.1 als Durchschnittswerte dargestellt. Bei der aufklappenden biplanaren Osteotomie in einer absteigenden retrotuberositäre Technik (Gruppe HTO 3) kam es wegen des längeren frontalen Schnittes zu wesentlich größeren Knochenoberflächen im Vergleich zur klassischen, aufklappenden Technik der Tibia (Gruppe HTO 2) mit aufsteigendem, frontalem Schnitt.

Vergleichbare Knochenoberflächen wurden zwischen Gruppe HTO 2 und der zuklappenden uniplanaren HTO Osteotomie Technik (Gruppe HTO 4) gemessen. Im Vergleich zu der aufklappenden uniplanaren Technik (Gruppe HTO 1) zeigte die klassische aufklappende Technik der Tibia (Gruppe HTO 2) mit aufsteigendem frontalem Schnitt leicht größere Knochenoberflächen.

Die frontalen Schnitte der biplanaren Osteotomien, klassisch (Gruppe HTO 2) und retrotuberositären (Gruppe HTO 3), belaufen sich auf 21 Prozent (\pm 5 Prozent SD) und 31 Prozent (\pm 6 Prozent SD) der gesamten Knochenkontaktfläche.

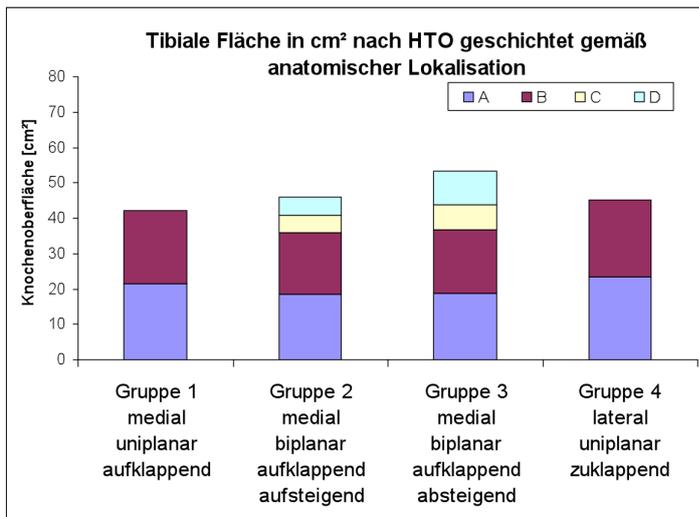


Abbildung 4.1.1: Aufsummierung tibialer Flächen in cm², geschichtet gemäß anatomischer Lokalisation der verschiedenen Osteotomieebenen. Kennzeichnung der tibialen Flächen: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal (siehe auch Abbildung 3.5.1).

Tabelle 4.1.1		Osteotomieflächen in (cm ²)			
Gruppe HTO 1	A	B			
1	22.3	21.8			
2	22.8	21.8			
3	20	18.5			
4	22.5	21			
5	20.5	19.5			
Mittelwert	21.6	20.5			
SD	1.3	1.5			
Gruppe HTO 2	A	B	C	D	
1	19.2	18.3	4.2	5	
2	16.2	15.5	4.8	5.2	
3	16.3	14.9	4.8	5.3	
4	21.2	20	4.9	5.1	
5	19.5	18.2	5.1	5.3	
Mittelwert	18.5	17.4	4.8	5.2	
SD	2.2	2.1	0.3	0.1	
Gruppe HTO 3	A	B	C	D	
1	21	19.5	11.8	15.3	
2	18.5	18	5.8	8.3	
3	16.3	15.3	6.3	7.3	
4	18.5	18	5.8	8.3	
5	19.5	18.5	6.3	7.3	
Mittelwert	18.8	17.9	7.2	9.3	
SD	1.7	1.6	2.6	3.4	
Gruppe HTO 4	A	B			
1	23.7	23.2			
2	24.6	22.5			
3	23.5	21.5			
4	23.5	21.5			
5	22.3	20			
Mittelwert	23.5	21.7			
SD	0.8	1.2			

Tabelle 4.1.1: Horizontale und vertikale Osteotomieflächen (in cm²) der Tibiae. Kennzeichnung der Gruppen: aufklappend uniplanar (HTO 1), aufklappend biplanar aufsteigend (HTO 2), aufklappend biplanar absteigend (HTO 3) und zuklappend uniplanar (HTO 4). Kennzeichnung der tibialen Flächen: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal (siehe auch Abbildung 3.5.1).

4.1.2 Keilvolumen in Abhängigkeit von den HTO Osteotomietechniken

Das Verhältnis der aus den unterschiedlichen Techniken entstandenen Keilvolumen zueinander blieb unter den drei ausgewählten Keilhöhen 5 mm, 10 mm und 15 mm konstant. Es konnten keine bedeutenden Differenzen der Keilvolumina zwischen den auf- und absteigenden, biplanaren, aufklappenden Osteotomietechniken gefunden werden. Nach Anwendung der aufsteigenden frontalen Schnitttechnik ergab sich das kleinste Keilvolumen

(Abbildung 4.1.2 und Tabelle 4.1.2). Wesentlich ist, dass das jeweilige Keilvolumen bedeutend höher war, wenn die uniplanare, aufklappende Technik im Vergleich zu beiden biplanaren Gruppen zum Einsatz kam.

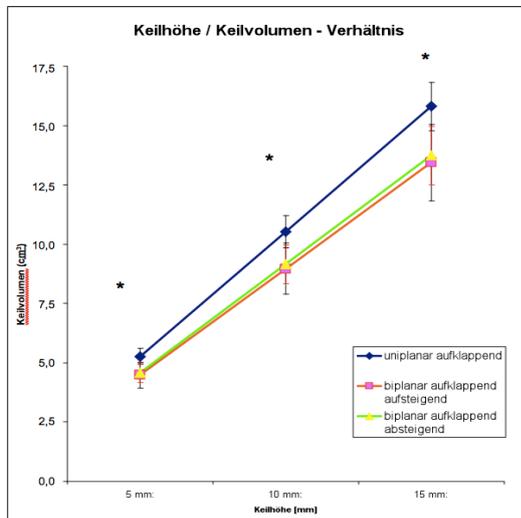


Abbildung 4.1.2: Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10 und 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem Keilvolumen (mm³), bei aufklappenden HTO-Techniken.

Tabelle 4.1.2	Keilbasishöhe in (cm)		
	0,5	1	1,5
Gruppe HTO 1	Gruppe HTO 1	Gruppe HTO 1	Gruppe HTO 1
	Keilvolumen in (cm ³)		
1	5.51	11	16.5
2	5.58	11.15	16.73
3	4.81	9.63	14.44
4	5.44	10.88	16.31
5	5	10	15
Mittelwert	5.27	10.53	15.8
SD	0.34	0.67	1.01
Gruppe HTO 2	Gruppe HTO 2	Gruppe HTO 2	Gruppe HTO 2
	Keilvolumen in (cm ³)		
1	4.69	9.38	14.06
2	3.96	7.93	11.89
3	3.9	7.8	11.7
4	5.15	10.3	15.45
5	4,71	9.43	14.14
Mittelwert	4.43	8.97	13.45
SD	0.6	1.07	1.61
Gruppe HTO 3	Gruppe HTO 3	Gruppe HTO 3	Gruppe HTO 3
	Keilvolumen in (cm ³)		
1	5.06	10.13	15.19
2	4.56	9.13	13.69
3	3.95	7.9	11.85
4	4.56	9.13	13.69
5	4.75	9.5	14.25
Mittelwert	4.58	9.16	13.73
SD	0.41	0.81	1.22

Tabelle 4.1.2: Entstandene Keilvolumina (cm³) nach aufklappenden Osteotomien in Abhängigkeit der Osteotomietechnik und der Keilbasishöhe (cm). Kennzeichnung der Gruppen: aufklappend uniplanar (HTO 1), aufklappend biplanar aufsteigend (HTO 2) und aufklappend biplanar absteigend (HTO 3).

4.2 Ergebnisse der DFO-Techniken

4.2.1 Oberflächen der unterschiedlichen femoralen Ebenen

Entsprechend den angewendeten operativen Standardtechniken wurde ein 0,8 mm dickes Sägeblatt für alle horizontalen knöchernen Schnitte verwendet. Demzufolge waren die entsprechenden femoralen Ebenen nicht völlig kongruent, nachdem die Osteotomieschnitte durchgeführt wurden. Es wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Größe der distalen und proximalen horizontalen Osteotomieebenen (Ebene A und B) innerhalb und zwischen uniplanaren und biplanaren Gruppen gefunden (Abb. 4.2.1 und Tabelle 4.2.1). Eine unwesentliche Neigung zu größeren frontalen Osteotomieebenen der biplanaren, aufklappenden Gruppe (Gruppe DFO 3) wurde gegenüber der biplanaren schließenden Gruppe (Gruppe DFO 4) gefunden. Schließlich zeigte die Aufsummierung der femoralen Oberflächen in mm² keinen signifikanten Unterschied innerhalb der uniplanaren und der biplanaren Gruppe. In den biplanaren Gruppen (Gruppen DFO 3 und DFO 4) wurde jedoch eine wesentlich höhere femorale Oberfläche im Vergleich zu den uniplanaren Gruppen (Gruppe DFO 1 und DFO 2) (ANOVA, $p = 0,036$, Abbildung 4.2.1 und Tabelle 4.2.1) festgestellt.

Die durchschnittlichen Oberflächen der gegenüberliegenden horizontalen Schnittflächen waren in der uniplanaren aufklappenden Technik am größten. Sowohl eine Abnahme der proximalen Schnittfläche (A) als auch der dorsalen, biplanaren Kontaktfläche (D) bei den uniplanaren wie den biplanaren, schließenden Techniken stand in Bezug zu einem Anstieg in der Keilkorrektur, da der proximale Schnitt mit ansteigenden Keilhöhen zunehmend proximal positioniert wurde (Abb. 4.2.1.2, Abb. 3.4.2, Abb. 3.4.4 und Tabelle 4.2.1). Die femorale Oberfläche des biplanaren Schnittes war bei der aufklappenden Technik größer, was auf die mehr proximale Lokation des Anfangspunktes des biplanaren Schnittes in Relation zur Gelenklinie zurückzuführen ist. Mit derselben abfallenden Schrägstellung des Schnittes muss der Endpunkt des Schnittes im Vergleich zur medialen, schließenden Technik zunehmend proximal positioniert sein, da der mediale Kondylus höher ist als der laterale, femorale Kondylus. Da bei beiden Techniken biplanare Schnitte in einem 90°-Winkel zum horizontalen Schnitt gemacht werden, differiert die Länge in Abhängigkeit vom Betrag der Antekurvation des Femur.

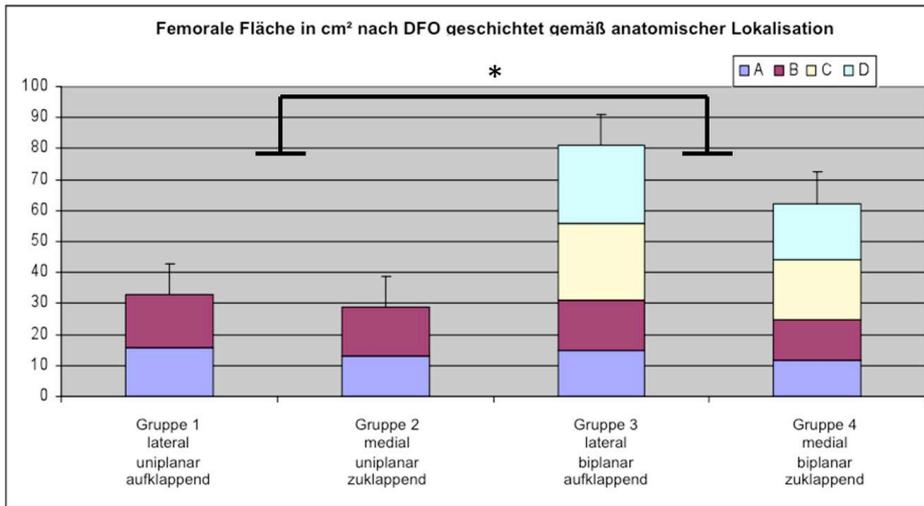


Abbildung 4.2.1.1: Aufsummierung femoraler Flächen in cm², geschichtet gemäß anatomischer Lokalisation der unterschiedlichen Osteotomieebenen. Kennzeichnung der femoralen Flächen: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal (siehe auch Abbildung 3.5.2). Die Keilbasishöhe war standardisiert auf 10 mm. Knöcheloberflächen waren signifikant größer nach biplanarer DFO (Gruppe 3 und Gruppe 4) als nach uniplanarer DFO ($P < 0,05$).

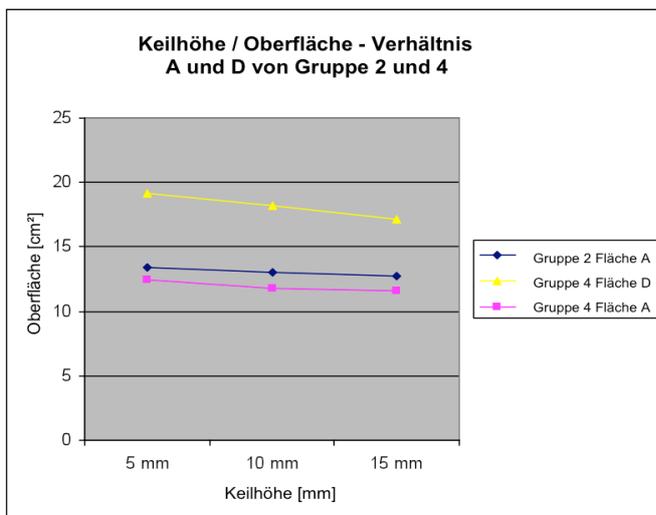


Abbildung 4.2.1.2: Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und berechneter Oberfläche A und D (cm²) bei schließenden, uniplanaren (Gruppe DFO 2) sowie biplanaren (Gruppe DFO 4) DFO-Techniken.

Tabelle 4.2.1	Osteotomieflächen in [cm ²]							
Gruppe DFO 1	A				B			
LUA								
1	16.7				17.3			
2	16.5				16.6			
3	14.6				15.6			
4	15.1				17.2			
Mittelwert	15.7				17.9			
SD	1.05				0.83			
Gruppe DFO 2	A	A	A	B				
MUZ	Resezierte Keilhöhe							
	5 mm	10 mm	15 mm					
1	13.5	13.2	12.8	13.8				
2	13.4	12.7	12.4	13.2				
3	13.1	13	11	13.5				
4	14.1	13.4	13.2	14.4				
5	12.9	12.6	12.6	13.3				
6	13.5	13.2	13.2	13.5				
Mittelwert	13.4	13	12.7	13.6				
SD	0.39	0.32	0.47	0.45				
Gruppe DFO 3	A				B	C	D	
LBA								
1	15.7				16.5	22.3	23.8	
2	14.4				16.9	26.4	27.2	
3	13.9				15.2	26.7	26.9	
4	15.7				17	22.2	23.1	
5	14.6				16	25.3	26.5	
Mittelwert	14.8				16.3	24.6	25.5	
SD	0.8				0.75	2.19	1.91	
Gruppe DFO 4	A	A	A	B	C	D	D	D
MBZ	Resezierte Keilhöhe					Resezierte Keilhöhe		
	5 mm	10 mm	15 mm			5 mm	10 mm	15 mm
1	13.5	12	12.9	13.4	19.2	19.4	17	16.5
2	12.9	11.7	12.3	13	18.6	18.5	17.1	16.1
3	11.8	11.1	11	12.6	17.9	17.6	16.8	16.1
4	11.6	11.3	10.4	12.7	20.4	19.6	18.9	17.5
5	12.8	12.1	11	14.1	19.8	20.9	20.1	19.2
Mittelwert	12.5	11.8	11.5	13.1	19.2	19.2	18.2	17.1
SD	0.81	0.75	1.02	0.61	0.98	1.25	1.42	1.32

Tabelle 4.2.1: Horizontale und vertikale Osteotomieflächen (in cm²) der Femurs. Kennzeichnung der Gruppen: lateral uniplanar aufklappend (LUA), medial uniplanar zuklappend (MUZ), lateral biplanar aufklappend (LBA) und medial biplanar zuklappend (MBZ). Kennzeichnung der femoralen Flächen: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal.

4.2.2 Keilvolumen in Abhängigkeit von den DFO Osteotomietechniken

Das Verhältnis der drei ausgewählten Keilvolumen zueinander, die aus den unterschiedlichen Techniken resultieren, blieb konstant. Die Keilvolumina der uniplanaren, aufklappenden Osteotomien waren größer als bei der biplanaren Technik. Zwischen den schließenden Techniken konnten keine Unterschiede gefunden werden.

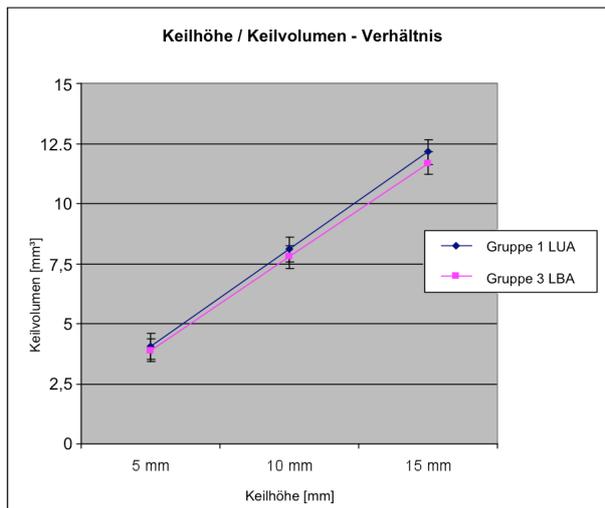


Abbildung 4.2.2 : Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem Keilvolumen (cm³), bei aufklappenden Techniken. Kennzeichnung der Gruppen: lateral uniplanar aufklappend (LUA) und lateral biplanar aufklappend (LBA).

Tabelle 4.2.2	Osteotomieebene		Grundfläche	Keilvolumen [cm ³] = AB/2 x h x 0,5		
	A [cm ²]	B [cm ²]		AB/2 [cm ²]	h = Keilhöhe [cm]	
			h = 0,5 cm		h = 1 cm	h = 1,5 cm
Gruppe DFO 1						
LUA			AB/2	x 0,25	x 0,5	x 0,75
1	16.7	17.3	17	4.25	8.5	12.8
2	16.5	16.6	16.6	4.1	8.3	12.4
3	14.6	15.6	15.1	3.8	7.6	11.3
4	15.1	17.2	16.2	4	8.1	12.1
Mittelwert	15.7	16.7	16.2	4.1	8.1	12.2
SD	1.05	0.77	0.81	0.19	0.39	0.62
Gruppe DFO 3						
LBA			AB/2	x 0,25	x 0,5	x 0,75
1	15.7	16.5	16.1	4	8.1	12.1
2	14.4	16.9	15.7	4.2	8.3	12.5
3	13.9	15.2	14.6	3.6	7.3	10.9
4	15.7	17	16.4	4.1	8.2	12.3
5	14.6	16	15.3	3.8	7.7	11.5
Mittelwert	14.9	16.3	15.6	3.9	7.8	11.7
SD	0.8	0.75	0.71	0.24	0.41	0.65

Tabelle 4.2.2: Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem

Keilvolumen (cm³) bei aufklappenden Techniken. Kennzeichnung der Gruppen: lateral uniplanar aufklappend (LUA) und lateral biplanar aufklappend (LBA). Kennzeichnung der femoralen Flächen: A = proximal und horizontal, B = distal und horizontal, C = ventral und vertikal, D = dorsal und vertikal.

5. Diskussion

5.1 Wichtigste Erkenntnisse HTO & DFO

Dieser geometrischen Saw-Bone Studie liegt die Annahme zugrunde, dass die biplanaren Operationstechniken von HTO und DFO deswegen klinisch erfolgreich sind, weil sie günstige geometrische Voraussetzungen vereinen, die für eine zügige Knochenheilung wichtig sind: die Kombination aus kleinem Keilvolumen und großer spongiöser Oberfläche.

Die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit sind, dassunter den aktuell befürworteten kniegelenksnahen Osteotomietechniken die medial öffnende biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie als HTO sowie die medial schließende biplanare Technik als DFO ideale geometrische Voraussetzungen schaffen für die Knochenheilung.

Bezüglich der HTO zeigt bei geringeren Öffnungswinkeln auch die medial öffnende biplanare Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie eine gute Geometrie. Im Gegensatz zu der medial öffnenden uniplanaren Technik kombinieren die biplanaren HTO Techniken große spongiöse Knochenoberflächen sowie relativ geringe Keilvolumina der knöchernen Defektzonen. Die heute nicht mehr empfohlene und separat diskutierte lateral schließende uniplanare Technik zeigt bezüglich den untersuchten geometrischen Kriterien mit einem in Annäherung Keilvolumen von Null eine besonders gute Voraussetzung.

Für die distale femorale Osteotomie zeigen sich die geometrischen Voraussetzungen nach medial schließender biplanarer DFO Technik als ideal für die Knochenheilung. Die medial schließende uniplanare Technik erzeugt eine relativ geringere spongiöse Knochenoberfläche. Die lateral öffnende biplanare Technik kreiert eine größere keilförmige knöchernen Defektzone. Die lateral öffnende uniplanare Technik vereint eine geringere spongiöse Knochenoberfläche mit einer großen knöchernen Defektzone zu einer nachteiligen geometrischen Konstellation.

5.2 Primäre und sekundäre Knochenheilung

Radiologische Langzeitstudien der Knochenheilung nach einer aufklappenden HTO zeigten, dass Kontaktheilung und die Heilung des Knochenspaltes nach einer aufklappenden HTO gleichzeitig auftreten (Staubli, 2008). Die Kontaktheilung wird auch als primäre oder direkte Knochenheilung und die Defektheilung als sekundäre oder indirekte Knochenheilung bezeichnet.

Die primäre Knochenheilung überbrückt einen Spalt bis zu 0,5 mm und sorgt für eine viel schnellere Heilung der Knochenkontaktflächen unter stabilen Bedingungen als die Spaltheilung (Perren, 2008; Schenk und Willenegger, 1977).

Diese histologischen Befunde wurden von Staubli's radiologischer Studie unterstützt, in der die Kontaktheilung zwischen den parallelverschobenen aufsteigenden Osteotomieflächen schon drei Wochen nach der Operation erfolgt war. Möglichst ausgedehnte Kontaktzonen bedeuten für eine Osteotomietechnik somit viel schnelle primäre Knochenheilung und frühe Konsolidierung.

Anders als bei der Kontaktheilung, dauert es bei der Defektheilung des Keilvolumens zwischen den distraktierten horizontalen Osteotomieflächen mindestens sechs Wochen, bis ein Drittel der Keiloberfläche verheilt ist. Die Heilreaktion beginnt lateral an der Keilspitze und somit am Scharnier der Osteotomie und setzt sich medial zur Keilbasis bzw. der Osteotomieöffnung fort (Staubli, 2008; Staubli und Jacob, 2010). Möglichst geringe Keilvolumina bedeuten für eine Osteotomietechnik somit weniger langsame sekundäre Knochenheilung zur Defektauffüllung.

5.3 Kontaktfläche der Osteotomie

Methodisch wurden in dieser Arbeit die Osteomieflächen sowie die Keilvolumina der knöchernen Defektzonen quantifiziert. Die resultierenden knöchernen Kontaktzonen der spongiösen Oberflächen nach entsprechender achskorrigierender Verschiebung und Distraction zwischen den proximalen und distalen Osteotomieflächen wurden nicht quantifiziert. Da die knöchernen Kontaktzonen, welche nach der jeweiligen Osteotomietechnik verbleiben, eine schnelle primäre Knochenheilung ermöglichen, wird dieser geometrische Parameter theoretisch analysiert.

Eine dreidimensionale geometrische Vorstellung erlaubt es, den Effekt der untersuchten operativen Techniken auf die resultierenden Kontaktzonen zumindest in ihrer Größenrelation korrekt einzustufen. Betrachtet man die quantifizierten spongiösen Knochenoberflächen der verschiedenen Osteotomieebenen und berücksichtigt die Relativbewegung der Knochenanteile durch die Achskorrektur, so können die resultierenden Kontaktflächen der vertikalen und horizontalen Osteotomien in ihrer relativen Größenordnung estimiert werden.

In der HTO Untersuchungsserie ergibt sich folgende Größenrelation: Offensichtlich ist die Betrachtung der horizontalen Kontaktflächen. So bietet die lateral schließende uniplanare Technik (Gruppe HTO 4) die größte Gesamtkontaktfläche, während die medial aufklappende uniplanare Technik (Gruppe HTO 1) wie auch die biplanaren aufklappenden Techniken eine in Annäherung nicht vorhandene horizontale Kontaktfläche aufweist. Der geometrische Vergleich der biplanaren Techniken bezüglich der ventral verbleibenden vertikalen Kontaktfläche suggeriert eine größere Kontaktzone für die absteigende Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 3) als für die aufsteigende Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2). Aus klinischer Erfahrung zeigt ein aufsteigender Osteotomieschnitt in Annäherung eine knapp 2 cm vertikale und knapp 3 cm horizontale Ausdehnung an seiner Basis. Ein absteigender Osteotomieschnitt zeigt bei ebenfalls knapp 3 cm horizontaler Ausdehnung an seiner Basis eine ca. 3 cm vertikale Ausdehnung. Bedenkt man, dass die Osteotomieflächen sich basisfern etwas verjüngen (siehe Abbildung 3.5.1), dann decken sich diese Werte auch mit den

quantifizierten Osteotomieflächen C von im Mittel 4.8 cm² für die aufsteigende und 7.2cm² für die absteigende ventrale Osteotomie.

Bei größeren Ausgangswerten für die knöchernen distalen und proximalen vertikalen Oberflächen C und D führt die absteigende Tuberositasosteotomie nach Aufklappen zu einer höheren knöchernen Restüberlappung. Die relative Differenz der verbleibenden vertikalen Kontaktfläche nimmt mit dem Korrekturgrad bzw. der Keilbasishöhe zu. Praktisch ist bei einer 15 mm Korrektur für die aufsteigende Tuberositasosteotomie kaum noch eine vertikale Kontaktfläche zu erwarten, während die absteigende Tuberositasosteotomie noch eine deutliche aufzeigen würde. Die horizontale knöcherne Kontaktzone an der Keilspitze bzw. im Osteotomiescharnier zeigt bei den beiden biplanaren Techniken keine relevante Differenz und geht in der Annäherung gegen Null.

In der DFO Untersuchungsserie ergibt sich folgende Größenrelation: Beim Vergleich der biplanaren Techniken (Gruppe DFO 3 und DFO 4) bezüglich der vertikalen Kontaktzone führt die medial schließende Technik (Gruppe DFO 4) entsprechend dem Formschluss zu einem deutlich höheren Wert als die lateral öffnende Technik (Gruppe DFO 3). Wird die horizontale Kontaktfläche additiv betrachtet, dann zeigt die medial schließende biplanare Technik (Gruppe DFO 4) die größte Gesamtkontaktzone. Die uniplanar medial schließende uniplanare Technik (Gruppe DFO 2) zeigt eine größere Gesamtkontaktzone, als die lateral aufklappende biplanare Technik (Gruppe DFO 3). Die lateral aufklappende uniplanare Technik (Gruppe DFO 1) zeigt eine in Annäherung nicht vorhandene Kontaktfläche.

5.4 Geometrische Folgerung der Daten

Die knöcherne Geometrie nach HTO lässt annehmen, dass die biplanaren, medial öffnenden Techniken nicht nur Knochenkeile mit geringerem Volumen und die größere spongiöse Knochenoberflächen erzeugen, sondern auch eine vermehrte Kontaktfläche vermitteln als eine uniplanar öffnende Technik. Die ebenso betrachtete

„subtrahierende“ lateral schließende uniplanare Technik besitzt bei relativ geringer Knochenoberfläche die höchste Gesamtkontaktfläche und in Annäherung ein nicht vorhandenes Knochenkeilvolumen. Bezüglich den knöchernen Parametern zeigt die „subtrahierende“ lateral schließende Technik im Vergleich zu den „addierenden“ Methoden gute geometrischen Voraussetzung für die Heilung. Die „addierenden“ Methoden unter sich verglichen, zeigen insbesondere bei höherem Korrekturgrad einen geometrischen Vorteil der biplanaren, medial öffnenden Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie.

Die knöchernen Geometrie nach DFO suggeriert, dass die „subtrahierende“ medial schließende biplanare Technik in der Summe die besten Voraussetzungen erzeugt bezüglich kleinerer Keilvolumina, größerer Knochenoberflächen sowie optimierter Kontaktflächen.

5.5 Lateral schließende HTO

Die uniplanar lateral schließende Osteotomie spielt aus unterschiedlichen Gründen eine zunehmende Außenseiterrolle. Werden allein die in dieser Arbeit untersuchten geometrischen Daten berücksichtigt, dann bietet diese Technik nahezu optimale Bedingungen. Die spongiösen Schnittflächen sind summarisch zwar etwas geringer als bei den biplanaren Techniken, werden aber nahezu vollständig zu einer Kontaktzone umgewandelt. Die Heilung kann hierdurch im idealisierten Zustand nahezu vollständig als schnelle primäre Knochenheilung ablaufen. Ein Keilvolumen, welches durch sekundäre Knochenheilung langsam aufgefüllt werden müsste, ist nicht existent. In Betrachtung des femoropatellaren Gelenkes, ist durch die subtrahierende Technik keine Verstärkung einer Patella infera oder retropatellare Druckerhöhung zu erwarten.

Andererseits gerät diese Technik auf Grund der erhöhten Komplikationsrate (Engel und Lippert, 1981; Matthews et al., 1988; Naudie et al., 1999) zunehmend ins Abseits - vor allem wegen der iatrogenen neurogenen Schäden und einer unvorteilhaften Verformung der proximalen Tibia. Technisch ist wegen den besonderen

anatomischen Gegebenheiten der Patella eine schräg verlaufende subtrahierende und orthograd zur lateralen Kortikalis ausgerichteten Doppelosteotomie von lateral nicht möglich. Der proximale Schnitt wird allgemein streng horizontal 2cm caudal der Gelenklinie durchgeführt. Dadurch ist die Osteotomie zwar metaphysär und intraligamentär bezüglich der Patellasehne, die distale Osteotomiefläche ist aber kleiner als die proximale. Es wird hierdurch eine Inkongruenz erzeugt. Nach dem Schließen der Keilresektion liegt kein optimaler kortikaler Kontakt vor. Es besteht ein lateraler Offset des proximalen Anteils des Tibiakopfes zur restlichen Tibia. Hierdurch wird die primäre Stabilität verschlechtert und das Risiko der Überkorrektur aufgrund des Einsinkens des proximalen Fragmentes in das distale Fragment erhöht. Aus selbigem Grund kann primär auch nur eingeschränkt eine effektive Kompression erzeugt werden. Außerdem kann von lateral nur schwierig ein geeignetes Osteosyntheseimplantat eingebracht werden. Die Primärstabilität ist hierdurch reduziert und das Risiko für Pseudarthrose und Korrekturverlust erhöht. Der erzeugte laterale Offset des Tibiakopfes relativ zum Tibiaschaft verschlechtert relevant die anatomischen Bedingungen für eine eventuelle sekundäre endoprothetische Versorgung (Amendola et al., 1989). Zusätzlich zur Doppelosteotomie der proximalen Tibia ist auch eine adjuvante Osteotomie der Fibula notwendig. Somit werden zwei Doppelosteotomien von lateral durchgeführt, wo anatomisch bedingt ein beachtliches Risiko für die iatrogene Verletzung des Nervus peroneus besteht. Auch die doppelte Osteotomie der dorsalen Kortikalis der proximalen Tibia beherbergt ein größeres Risiko für das dorsal verlaufende Nervengefäßbündel.

Die lateral schließende HTO bleibt eine wertvolle chirurgische Alternative, insbesondere für Patienten mit einer verringerten Knochenheilungskompetenz oder einer Patella infera (Jacobi und Jakob, 2008; Schallberger et al., 2011), wird aber zurecht nicht mehr als bevorzugte Methode betrachtet.

5.6 Einschränkungen der Studie

Die vorliegende Arbeit zeigt sowohl methodische als auch inhaltliche Einschränkungen. Der Versuchsaufbau idealisiert die Knochengeometrie unter Missachtung von biologischen und mechanischen Faktoren, die ebenfalls Einfluss auf die Osteotomieheilung nehmen können.

Die verwendete Formel zur Berechnung der Keilvolumina bietet lediglich Näherungswerte und weist einen systematischen Fehler auf, der jedoch alle verwendeten Knochen in gleicher Weise betrifft.

Die Technik der Berechnung der Keilvolumina basiert auf einer geometrischen Idealisierung anstelle einer Messung nach der Methode von Archimedes, der den Osteotomiespalt mit Knochenzement füllte. Die Alternative zur Berechnung in Anlehnung an das archimedische Prinzip ist in der praktischen Umsetzung ebenfalls mit Fehlern behaftet, weil die Zementfüllung eine unkontrollierbare Menge an Luftblasen enthalten kann. Frühere Tests zeigten entsprechend Zufallsfehler beim Messvolumen (Pape et al., 2012).

Die resultierenden knöchernen Kontaktzonen der geschaffenen spongiösen Oberflächen sind nur theoretisch diskutiert, nicht aber quantifiziert worden.

Ein weiterer Kritikpunkt der Methode ist, dass die für die weiterführende Schlußfolgerung angenommene Kontaktheilung nur für die HTO bereits radiologisch nachgewiesen wurde. Für die DFO gibt es weder direkte radiologische noch histologische Studien. Die unterstellte Kontaktheilung für die DFO basiert somit auf einer Extrapolierung und ist nicht gesichert. Jedoch wurde für die mit winkelstabilen Implantaten ausreichend stabilisierte HTO gezeigt, dass schnelle primäre Heilung in den Kontaktzonen sowohl bei schließenden Techniken in der horizontalen Osteotomie, als auch in der vertikalen Osteotomie in biplanar öffnenden Techniken eintritt (Perren, 2008; Schenk und Willenegger, 1977; Staubli, 2008; Staubli und Jacob, 2010). Wir

erwarten identische zeitliche Unterschiede der knöchernen Konsolidierung in den Osteotomien des distalen Femurs, solange sie ebenfalls mit winkelstabilen Implantaten ausreichend primärstabilisiert werden.

5.7 Schlussfolgerung

Die vorliegenden Daten quantifizieren gewisse geometrische Aspekte unterschiedlicher Osteotomietechniken und machen den Vergleich objektiver. Diese idealisierte geometrische Betrachtung berücksichtigt jedoch die biologischen und mechanischen Faktoren der Osteotomieheilung nicht. Die vorgestellten geometrischen Daten legen eine generelle Regel für die Anwendung von Standardtechniken der Osteotomie und deren chirurgischen Modifikationen nahe: Die Reduktion der Knochenkeilvolumina mit ihrer langsamen Defektheilung durch sekundäre Knochenheilung und die gleichzeitige Vergrößerung der knöchernen spongiösen Oberflächen und deren Kontaktzonen mit ihrer schnellen primären Knochenheilung. Beides ist für die Osteotomieheilung günstig.

Für die HTO bedeutet das, dass unter Vernachlässigung der komplikationsträchtigen lateral schliessenden Technik für die klinische Praxis prinzipiell die biplanaren Osteotomien die geometrisch bevorteilten Techniken sind. Hierdurch werden sowohl Knochenkeile mit geringerem Volumen, als auch die grössere spongiöse Knochenoberflächen erzeugt. Da die uniplanar aufklappende Technik prinzipbedingt keine ventralen Kontaktflächen bildet, kann sicher eine vermehrte ventrale Kontaktfläche für die biplanaren Techniken angenommen werden. Die absteigende Tuberositasosteotomie zeigt vermutlich wegen des deutlich längeren Osteotomieschnittes auch eine höhere ventrale Kontaktfläche in der vertikalen Osteotomie als die Aufsteigende. Wir nehmen an, dass mit zunehmendem Korrekturgrad die relative Differenz der ventralen Kontaktzone bedeutender wird. Auch zur Berücksichtigung einer bestehenden Patella infera oder einer retropatellaren Problematik ist die absteigende Tuberositasosteotomie vorteilhaft. Bei großen Korrekturen sollte deshalb biomechanisch und geometrisch eine absteigende Tuberositasosteotomie generell bevorzugt werden.

Diese Technik sollte trotz ihrer Nachteile, bezüglich einem geringfügig erhöhtem Risiko der Fraktur des Tuberositassegments und der Notwendigkeit einer zusätzlichen Schraubenfixation, mehr Routineanwendung finden. Die auf Grund von Komplikationen und unvorteilhafter anatomischer Veränderung der proximalen Tibia zunehmend vernachlässigte schließende Technik bietet mit einem fast abwesenden Keilvolumen und einem hohen Betrag an Knochen-auf-Knochen-Kontaktflächen ebenfalls gute geometrische Voraussetzungen für die Heilung.

Wie bei den Tibiaosteotomien wurden auch bei den distalen Femurosteotomien neben den uniplanaren Standardtechniken, medial zuklappend und lateral aufklappend, die biplanare, mediale, zuklappende Technik eingeführt (Brinkman et al., 2011b; Freiling et al., 2010). Die in dieser Arbeit untersuchte knöcherne Geometrie nach DFO zeigt, dass die „subtrahierende“ medial schließende biplanare Technik kleinere Keilvolumina sowie größere Knochenoberflächen schafft. Ein optimierter Kontakt der Knochenflächen wird erzeugt und eine gute Kompression von Kortikalis auf Kortikalis prinzipbedingt ermöglicht. Im Vergleich zu der lateral biplanar öffnenden sowie der lateral uniplanar öffnenden und der medial uniplanar schließenden Technik, bietet diese Technik optimierte geometrische Voraussetzungen für die Knochenheilung. Ein wesentlicher zusätzlicher Vorteil der biplanaren Schnitttechniken ist, dass der trochleare Bereich umgangen werden kann (van Heerwaarden et al., 2008). Die horizontalen Schnitte der biplanaren Techniken können im Hinblick auf eine bessere Heilung und einer biomechanisch optimierten möglichst gelenknahen Korrektur weit distal in die Metaphyse positioniert werden.

Unter der Annahme einer frühen Kontaktheilung der vertikalen und horizontalen Osteotomie sowie der kortikalen Kompression kongruenter horizontaler Osteotomieflächen fördert die biplanar schließende distale Femurosteotomie relevant die primäre Knochenheilung und ermöglicht durch den Formschluss in Kombination mit einem rigiden Plattenfixateur die hierfür notwendige hohe primäre Stabilität in allen Ebenen. Aufgrund der hohen Primärstabilität und frühen Kontaktheilung wird die früh mögliche Mobilisierung und Aufbelastung sowie die Vermeidung von Korrekturverlusten und Pseudoarthrosen erwartet.

Die vorliegende Arbeit quantifiziert den signifikanten geometrischen Unterschied verschiedener DFO Techniken und diskutiert die anzunehmenden Vorteile der medial schließenden biplanaren Technik. Zukünftige Studien müssen jedoch zeigen, ob die tatsächliche Knochenheilung im distalen Femur äquivalent zur unkomplizierten knöchernen Abheilung in biplanarer HTO (Staubli, 2008; Staubli und Jacob, 2010) verbessert werden kann. In klinischer Anwendung sollte eine biplanare und nicht eine uniplanare Osteotomie zur Achskorrektur am distalen Femur durchgeführt werden. Die mediale schließende Technik sollte hierbei der lateral öffnenden Technik, auf Grund der Vermeidung einer ausgedehnten sekundären knöchernen Defektheilung in dieser mechanisch hoch belasteten Region, vorgezogen werden.

6. Literaturverzeichnis

Amendola et al., 1989

Amendola A, Rorabeck CH, Bourne RB, Apyan PM (1989) Total knee arthroplasty following high tibial osteotomy for osteoarthritis. *J Arthroplast* 4:11–17

Amendola und Bonasia, 2010

Amendola A, Bonasia DE (2010) Results of high tibial osteotomy: review of the literature. *Int Orthop* 34:155–160

Brinkman et al., 2011a

Brinkman J-M, Hurschler C, Agneskirchner JD, Freiling D, van Heerwaarden RJ (2011a) Axial and torsional stability of supracondylar femur osteotomies: a biomechanical investigation of five different plate and osteotomy configurations. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 19:579–587

Brinkman et al., 2011b

Brinkman J-M, Hurschler C, Agneskirchner JD, Freiling D, van Heerwaarden RJ (2011b) Axial and torsional stability of an improved single plane and a new biplanar osteotomy technique for supracondylar femur osteotomies. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 19:1090–1098

Brinkman et al., 2012

Brinkman J-M, Hurschler C, Agneskirchner J, Lobenhoffer P, Castelein RM, van Heerwaarden RJ (2012) Biomechanical testing of distal femur osteotomy plate fixation techniques: the role of simulated physiological loading. Submitted/Accepted for publication *Injury*

Engel und Lippert, 1981

Engel GM, Lippert FG (1981) Valgus tibial osteotomy: avoiding the pitfalls. *Clin Orthop Relat Res* 160:137–143

Fowler et al., 2000

Fowler P, Tan L, Brown G (2000) Medial opening wedge high tibial osteotomy: how I do it. *Oper Tech Sports Med* 8:32–38

Freiling et al., 2008

Freiling D, Lobenhoffer P, Staubli A, van Heerwaarden RJ (2008) Medial closed-wedge varus osteotomy of the distal femur. *Arthroscopie* 21:6–14

Freiling et al., 2010

Freiling D, van Heerwaarden R, Staubli A, Lobenhoffer P (2010) The medial closed wedge osteotomy of the distal femur for the treatment of unicompartmental lateral osteoarthritis of the knee. *Oper Orthop Traumatol* 22(3):317–334

Gaasbeek et al., 2004

Gaasbeek RD, Sonneveld H, van Heerwaarden RJ, Jacobs WC, Wymenga AB (2004) Distal tuberosity osteotomy in open wedge high tibial osteotomy can prevent patella infera: a new technique. *Knee* 11:457–461

Han et al., 2011

Han SB, Lee DH, Shetty GM, Chae DJ, Song JG, Nha KW (2011) A “safe zone” in medial open-wedge high tibia osteotomy to prevent lateral cortex fracture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* doi:10.1007/s00167-011-1706-7

Hofmann et al., 1991

Hofmann AA, Wyatt RW, Beck SW (1991) High tibial osteotomy. Use of an osteotomy jig, rigid fixation, and early motion versus conventional surgical technique and cast immobilization. *Clin Orthop Relat Res* 271:212–217

Iorio et al., 2011

Iorio R, Pagnottelli M, Vadala A, Giannetti S, Di SP, Papandrea P, Conteduca F, Ferretti A (2011) Open-wedge high tibial osteotomy: comparison between manual and computer-assisted techniques. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* doi:10.1007/s00167-011-1785-5

Jacobi und Jakob, 2008

Jacobi M, Jakob RP (2008) High tibial closed wedge osteotomy. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jakob RP (eds) *Osteotomies around the knee*. Thieme. AO Foundation Publishing, Stuttgart, pp 55–69

Jacobi et al., 2011

Jacobi M, Wahl P, Bouaicha S, Jakob RP, Gautier E (2011) Distal femoral varus osteotomy: problems associated with the lateral open-wedge technique. *Arch Orthop Trauma Surg* 131:725–728

Jakob und Jacobi, 2004

Jakob RP, Jacobi M (2004) Die zuklappende Tibiakopfoosteotomie in der Behandlung der unikompartimentären Arthrose. *Orthopäde*

Lobenhoffer und Agneskirchner, 2003

Lobenhoffer P, Agneskirchner JD (2003) Improvements in surgical technique of valgus high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 11:132–138

Lobenhoffer et al., 2004

Lobenhoffer P, Agneskirchner J, Zoch W. [Open valgus alignment osteotomy of the proximal tibia with fixation by medial plate fixator]. *Orthopäde* 2004; (33): 153-160.

Lobenhoffer und Freiling, 2008

Lobenhoffer P, Freiling D (2008) Development of plate fixators: current status and perspectives. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jakob RP (eds) Osteotomies around the knee. Thieme. AO Foundation Publishing, Stuttgart, pp 263–270

Matthews et al., 1988

Matthews LS, Goldstein SA, Malvitz TA, Katz BP, Kaufer H (1988) Proximal tibial osteotomy. Factors that influence the duration of satisfactory function. Clin Orthop Relat Res 229: 193–200

Naudie et al., 1999

Naudie D, Bourne RB, Rorabeck CH, Bourne TJ (1999) The install award. Survivorship of the high tibial valgus osteotomy. A 10- to -22-year followup study. Clin Orthop Relat Res 367:18–27

Paley und Pfeil, 2000

Paley D, Pfeil C (2000) Prinzipien der kniegelenksnahen Deformitätenkorrektur. Orthopäde 29:18–38

Pape et al., 2010

Pape D, Lorbach O, Schmitz C, Busch LC, Van GN, Seil R, Kohn DM (2010) Effect of a biplanar osteotomy on primary stability following high tibial osteotomy: a biomechanical cadaver study. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 18:204–211

Pape et al., 2011

Pape D, Kohn D, Van GN, Hoffmann A, Seil R, Lorbach O (2011) Differences in fixation stability between spacer plate and plate fixator following high tibial osteotomy. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. doi:10.1007/s00167-011-1693-8

Pape et al., 2012

Pape D, Dueck K, Haag M, Lorbach O, Seil R, Madry H (2012) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* doi: 10.1007/s00167-012-1913-x

Perren, 2008

Perren SM (2008) Fracture healing. The evolution of our understanding. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech* 75:241–246

Puddu et al., 2007

Puddu G, Cipolla M, Cerullo G, Franco V, Gianni E (2007) Osteotomies: the surgical treatment of the valgus knee. *Sports Med Arthrosc* 15:15–22

Schallberger et al., 2011

Schallberger A, Jacobi M, Wahl P, Maestretti G, Jakob RP (2011) High tibial valgus osteotomy in unicompartmental medial osteoarthritis of the knee: a retrospective follow-up study over 13–21 years. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 19:122–127

Schenk und Willenegger, 1977

Schenk RK, Willenegger HR (1977) Histology of primary bone healing: modifications and limits of recovery of gaps in relation to the extent of the defect. *Unfallheilkunde* 80:155–160

Shim et al., 2013

Shim JS, Lee SH, Jung HJ, Lee HI (2013) High tibial open wedge osteotomy below the tibial tubercle: clinical and radiographic results. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* doi:10.1007/s00167-011-1453-9

Staubli et al., 2003

Staubli A E, De Simoni C, Babst R, Lobenhoffer P. TomoFix: a new LCP-concept for open wedge osteotomy of the medial proximal tibia--early results in 92 cases. *Injury* 2003; (34 Suppl 2:B55-62.): B55-B62.

Staubli, 2008

Staubli AE (2008) Radiological examination of bone healing after open-wedge tibial osteotomy. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jacobs WC (eds) *Osteotomies around the knee*. Thieme. AO Foundation Publishing, Stuttgart, pp 131–146

Staubli und Jacob, 2010

Staubli AE, Jacob HA (2010) Evolution of open-wedge high tibial osteotomy: experience with a special angular stable device for internal fixation without interposition material. *Int Orthop* 34:167–172

van Heerwaarden et al., 2007a

van Heerwaarden RJ, Wymenga AB (2007a) Die suprakondyläre varisierende Femurosteotomie mit speziellem Plattenfixateur. In: Lobenhoffer P, Agneskirchner JD, Galla M (eds) *Kniegelenknahe Osteotomien Indikation Planung Operationstechnik mit Plattenfixateuren*. Thieme, Stuttgart, pp 93-106

van Heerwaarden et al., 2007b

van Heerwaarden RJ, Wymenga AB, Freiling D, Lobenhoffer P (2007b) Distal medial closed wedge varus femur osteotomy stabilized with the Tomofix plate fixator. *Oper Tech Orthop* 17:12–21

van Heerwaarden et al., 2008

van Heerwaarden RJ, Wymenga AB, Freiling D, Staubli AE (2008) Supracondylar varization osteotomy of the femur with plate fixation. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jakob RP (eds) *Osteotomies around the knee*. Thieme. AO Foundation Publishing, Stuttgart, pp 147–166

van Heerwaarden et al., 2012

van Heerwaarden RJ, Najfeld M, Brinkman M, Seil R, Madry H, Pape D (2012) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for distal femoral osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* doi: 10.1007/s00167-012-2127-y

Zhim et al., 2005

Zhim F, Laflamme GY, Viens H, Saidane K, Yahia L (2005) Biomechanical stability of high tibial opening wedge osteotomy: internal fixation versus external fixation. *Clin Biomech* 20:871–876

7. Publikationen / Dank

7.1 Publikationen

Pape D, Dueck K, Haag M, Lorbach O, Seil R, Madry H (2012) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.*

doi: 10.1007/s00167-012-1913-x

van Heerwaarden RJ, Najfeld M, Brinkman M, Seil R, Madry H, Pape D (2012) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for distal femoral osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.*

doi: 10.1007/s00167-012-2127-y

Pape D, van Heerwaarden R, Haag M, Seil R, Madry H (2014) Kniegelenknahe Osteotomietechniken Effekt auf Keilvolumina und knöchernen Kontaktflächen. *Orthopäde* 2014 · 43:966–975

doi: 10.1007/s00132-014-3029-0

7.2 Dank

Diese vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von August 2011 bis Oktober 2013 in der Abteilung für Orthopädie in der Clinique d'Eich unter der Leitung von Priv. Doz. Dr. med. D. Pape angefertigt.

Besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Dietrich Pape. Ich habe ihm nicht nur für seine Unterstützung bei dieser Doktorarbeit zu danken, sondern vor allem auch für einen großen Teil meiner klinischen Ausbildung. Das enorme fachliche Vertrauen, welches er mir entgegen brachte, hat mein berufliches Leben entscheidend geprägt und mir meine medizinische Zukunft ermöglicht.