

Orthopäde 2014 · 43:966–975
 DOI 10.1007/s00132-014-3029-0
 Online publiziert: 10. Oktober 2014
 © Die Autor(en) 2014. Dieser Artikel ist auf
 Springerlink.com mit Open Access verfügbar

D. Pape^{1,2} · R. van Heerwaarden³ · M. Haag⁴ · R. Seil^{1,2} · H. Madry^{2,5}

¹ Orthopädische Klinik des Centre Hospitalier de Luxembourg, Akademisches Lehrkrankenhaus der Universitätskliniken des Saarlandes, Luxembourg, Luxembourg

² Sports Medicine Research Laboratory, Public Research Centre for Health, Luxembourg, Centre Médical de la Fondation Norbert Metz, Luxembourg, Luxembourg

³ Department of Orthopaedics Maartenskliniek Woerden, Limb Deformity Reconstruction Unit, Woerden, Netherlands

⁴ Praxisklinik Fellbach, Fellbach, Deutschland

⁵ Experimental Orthopaedics and Osteoarthritis Research, Saarland University, Homburg, Deutschland

Kniegelenknahe Osteotomietechniken

Effekt auf Keilvolumina und knöcherne Kontaktflächen

Die hohe tibiale Osteotomie (HTO) und die distale Femurosteotomie (DFO) sind etablierte Verfahren zur Behandlung einer unikompartimentalen Varus- oder Valgusgonarthrose [1, 2, 9, 13, 15–19, 24, 27, 32, 36–38]. Die aufklappenden Osteotomietechniken werden zunehmend populär, da sie eine exakte intraoperative Einstellung des Korrekturwinkels ermöglichen. Gleichzeitig gewährleisten moderne winkelstabile Implantate die sichere Fixierung der geöffneten Osteotomieflächen bis zum Verschluss des Keilvolumens mit Kallusgewebe. Neben der Rigidität des Plattensystems ist aber in gleicher Weise eine gute Vaskularisation des Knochens eine Voraussetzung für die sichere Knochenheilung.

Die Kapazität der Knochenheilung nach einer kniegelenknahe Osteotomie kann zwischen verschiedenen Individuen variieren und hängt von zahlreichen biologischen Faktoren ab, die vor einer Osteotomie nicht alle umfassend eingeschätzt werden können. Im Gegensatz dazu lässt sich die Geometrie des Knochens nach abgeschlossener Osteotomie als Startpunkt der beginnenden Knochenheilung reproduzieren und quantifizieren.

Obwohl die biplanare Osteotomietechnik für HTO und DFO zunehmend favo-

risiert wird, wurden ihre theoretischen geometrischen Vorteile gegenüber den uniplanaren Techniken bislang nicht untersucht.

» Die Kombination aus kleinen Keilvolumina und großen knöchernen Kontaktflächen ist günstig

Aus Sicht der Knochenbiologie ist zu vermuten, dass die Kombination aus kleinen Keilvolumina und großen knöchernen Kontaktflächen am günstigsten für eine zügige Knochenheilung ist. In dieser Kunstknochenstudie wurden daher knöchernen Kontaktflächen und Keilvolumina von verschiedenen auf- und zuklappenden sowie uni- und biplanaren tibialen und femoralen Osteotomietechniken quantifiziert.

Material und Methodik

Den folgenden 4 Osteotomiegruppen wurden 20 tibiale Kunstknochen (Modell Nr. 1172, rechte Tibia mit 10° Varusdeformation des Tibiaplateaus, Synbone, Malans, Schweiz) zugeordnet (Gruppengröße $n=5$, **Abb. 1**):

— Gruppe 1: medial aufklappende uniplanare Technik,

- Gruppe 2: medial aufklappende biplanare Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie,
- Gruppe 3: medial aufklappende biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie,
- Gruppe 4: lateral zuklappende uniplanare Technik.

Die HTO-Techniken wurden entsprechend den Empfehlungen der relevanten Literatur durchgeführt [7, 8, 11, 14, 20–22, 35]. Wesentliche Unterschiede zwischen den chirurgischen Techniken der 4 HTO-Gruppen sind in **Tab. 1** zusammengefasst.

Bei allen biplanaren Osteotomien wurde eine horizontale Osteotomieführung mit einem aufsteigenden oder absteigenden vertikalen Schnitt dorsal der Tuberositas tibiae kombiniert. In Gruppe HTO 2 erfolgte die biplanare Osteotomie in der Frontalebene auf klassische Art aufsteigend und V-förmig, wobei die Tuberositas tibiae aufsteigend in einem 110°-Winkel zur Horizontalebene hinterschnitten wurde. In Gruppe HTO 3 verlief der V-förmige Teil des biplanaren Schnittes absteigend in einem 110°-Winkel zur Horizontalebene [11, 28]. In Gruppe HTO 4 wurde die lateral zuklappende HTO nach Hofmann et al. [35] mit Hilfe einer kalibrierten Sägelehre durchgeführt (**Abb. 1d, e**).



Abb. 1 ▲ **a** Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial uniplanar aufklappender HTO-Technik (Gruppe HTO 1) in frontaler (*links*) und medialer (*rechts*) Aufsicht. **b** Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial biplanar aufklappender HTO-Technik mit aufsteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 2) in frontaler (*links*) und medialer (*rechts*) Aufsicht. **c** Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit medial biplanar aufklappender HTO-Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie (Gruppe HTO 3) in frontaler (*links*) und medialer (*rechts*) Aufsicht. **d** Rechte Tibia valgisiert umgestellt mit lateral uniplanar zuklappender HTO-Technik (Gruppe HTO 4) in frontaler (*links*) und lateraler (*rechts*) Aufsicht. **e** Bei Gruppe HTO 4 wurde intraoperativ eine kalibrierte Sägelehre mit 2°-Schritten verwendet um das zuklappende Verfahren zu standardisieren

Zwanzig femorale Kunstknochen (Modell Nr. 1272, rechtes Femur, Synbone, Malans, Schweiz) mit einer distalen Valgusstellung von 10° wurden den folgenden 4 Osteotomiegruppen zugeordnet (Gruppengröße $n = 5$, ■ **Tab. 2**): Gruppe 1: late-

ral uniplanar aufklappend; Gruppe 2: medial uniplanar zuklappend; Gruppe 3: lateral biplanar aufklappend; Gruppe 4: medial biplanar zuklappend.

Die DFO-Techniken wurden entsprechend den Empfehlungen der relevanten

Literatur durchgeführt [3–6, 10, 12, 25, 31, 33]. Wesentliche Unterschiede zwischen dem chirurgischen Techniken der 4 DFO-Gruppen sind in der ■ **Tab. 2** zusammengefasst.

D. Pape · R. van Heerwaarden · M. Haag · R. Seil · H. Madry

Kniegelenknahe Osteotomietechniken. Effekt auf Keilvolumina und knöcherne Kontaktflächen

Zusammenfassung

Hintergrund. Die biplanare Operationstechnik kniegelenknaher Korrekturosteotomien soll im Gegensatz zur uniplanaren Technik die Heilungsgeschwindigkeit des Knochens begünstigen. Dies wird der größeren Kontaktfläche nach biplanarer Osteotomieführung zugeschrieben. Präzise Daten, die Angaben über die Größe der knöchernen Kontaktfläche und das zu füllenden Keilvolumen nach aufklappenden und zuklappenden Osteotomie geben, existieren nicht.

Ziel der Arbeit. Die Arbeit zeigt die Quantifizierung von Kontaktflächen und Keilvolumina nach auf- und zuklappenden, kniegelenknahen Osteotomien.

Material und Methode. Tibiale und femorale Kunstknochen wurden 4 verschiedenen

valgisierenden tibialen und varisierenden femoralen Osteotomietechniken zugeführt. Diese Techniken umfassten auf- und zuklappende sowie uniplanare und biplanare Verfahren. Die Kontaktflächen aller Osteotomieebenen wurden quantifiziert. Die Keilvolumina wurden mit Hilfe einer Prismaformel näherungsweise für eine Keilbasishöhe von 5, 10 und 15 mm errechnet.

Ergebnisse. Sowohl femorale als auch tibiale biplanare Osteotomietechniken schufen eine größere Kontaktfläche und ein kleineres Keilvolumen als die uniplanaren aufklappenden Techniken.

Diskussion. Trotz der idealisierten Bedingungen beim vorgestellten Versuchsaufbau am Kunstknochen lässt sich eine generelle

Regel für die Knochengometrie nach kniegelenknaher Osteotomie ableiten: die Vergrößerung der Kontaktflächen bei gleichzeitiger Verkleinerung der Keilvolumina schafft günstige geometrische Voraussetzungen für die Knochenheilung, da die Flächen der schnellen Kontaktheilung erhöht und die Volumina der langsamen Spaltheilung gleichzeitig vermindert werden. Dieser Effekt wird bei den vorgestellten Techniken nur durch eine biplanare Osteotomieführung erzielt.

Schlüsselwörter

Spaltvolumen · Knochenheilung · Knochengometrie · Heilungsgeschwindigkeit · Osteotomie, hohe tibiale

Osteotomy techniques close to the knee. Effect on wedge volume and bony contact surface

Abstract

Background. Bone geometry following osteotomy around the knee suggests that biplanar rather than uniplanar open wedge techniques simultaneously create smaller wedge volumes and larger bone surface areas. However, precise data on the bone surface area and wedge volume resulting from both open and closed wedge high tibial osteotomy (HTO) and distal femoral osteotomy (DFO) techniques remain unknown.

Objectives. It was hypothesized that biplanar rather than uniplanar osteotomy techniques better reflect the ideal geometrical requirements for bone healing, representing a large cancellous bone surface combined with a small wedge volume.

Methods. Tibial and femoral artificial bones were assigned to four different groups of valgisation and varisation osteotomy consisting of open wedge and closed wedge techniques in a uniplanar and biplanar fashion. Bone surface areas of all osteotomy planes were quantified. Wedge volumes were determined using a prism-based algorithm and applying standardized wedge heights of 5 mm, 10 mm and 15 mm.

Results. Both femoral and tibial biplanar osteotomy techniques created larger contact areas and smaller wedge volumes compared to the uniplanar open wedge techniques.

Conclusion. Although this idealized geometrical view of bony geometry excludes all

biological factors that might influence bone healing, the current data suggest a general rule for the standard osteotomy techniques applied and all surgical modifications: reducing the amount of slow gap healing and simultaneously increasing the area of faster contact healing may be beneficial for osteotomy healing. Thus, biplanar rather than uniplanar osteotomy should be performed for osteotomy around the knee.

Keywords

Wedge volume · Bone healing · Bone geometry · Healing rate · Osteotomy, high tibial

Kennzeichnung und Quantifizierung der Osteotomieflächen

Alle Osteotomieflächen der HTO- (Abb. 2a) und DFO-Gruppen (Abb. 2b) wurden wie folgt gekennzeichnet: Horizontale Flächen mit A = proximal und B = distal; frontale Flächen, falls vorhanden, mit C = ventral und D = dorsal. Die Konturen der Schnittflächen wurden auf Millimeterpapier übertragen und digitalisiert. Bei den uniplanaren Osteotomieproben entfielen die vertikalen Flächen C

und D (Gruppe HTO 1, Gruppe HTO 4, Gruppe DFO 1 und Gruppe DFO 2).

Mit Hilfe computergestützter Bildauswertung und nach einer Kalibrierung wurden die Flächen 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 betrug 0,173 in der HTO- und 0,168 in der DFO-Untersuchungsserie, womit keine Differenz zwischen dem Stichprobenmit-

tel und dem spezifischen Wert festgestellt werden konnte. Die Test-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.

Tab. 1 Anatomische und operationstechnische Merkmale zur Standardisierung der angewendeten Operationstechniken für die valgusierende Tibiakopfoleotomie (HTO)

	Gruppe HTO 1	Gruppe HTO 2	Gruppe HTO 3	Gruppe HTO 4
Operative Unterschiede	Aufklappend	Aufklappend	Aufklappend	Zuklappend
	Uniplanar	Biplanar	Biplanar	Uniplanar
Horizontale Osteotomie zum Lig. patellae	Intraligamentär	Extraligamentär	Extraligamentär	Intraligamentär
Horizontale Osteotomieebene				
Startpunkt	Med. Kortikalis	Med. Kortikalis	Med. Kortikalis	Lat. Kortikalis
	3 cm distal der Gelenklinie	4 cm distal der Gelenklinie	4 cm distal der Gelenklinie	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 Tuberositas tibiae	1 cm dorsal zur Tuberositas tibiae	
Endpunkt		Gegenkortikalis	Gegenkortikalis	
Ausrichtung		Aufsteigend im 110°-Winkel zur horizontalen Ebene	Aufsteigend im 110°-Winkel zur horizontalen Ebene	

Med. medial, lat. lateral, K Kirschner

Tab. 2 Anatomische Merkmale und operationstechnische Merkmale zur Standardisierung der angewandten Techniken für femorale Varisierungsosteotomien (DFO)

	Gruppe DFO 1	Gruppe DFO 2	Gruppe DFO 3	Gruppe DFO 4
Operative Unterschiede	Lateral	Medial	Lateral	Medial
	Uniplanar	Uniplanar	Biplanar	Biplanar
	Aufklappend	Zuklappend	Aufklappend	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 der medialen Gelenklinie	5 cm proximal 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			Ein Viertel dorsal zum anterioren Femur	Ein Viertel dorsal zum anterioren Femur
Endpunkt			Durchtrennung der Gegenkortikalis	Durchtrennung der Gegenkortikalis
Ausrichtung			Aufsteigend im 90°-Winkel zur horizontalen Ebene	Aufsteigend im 90°-Winkel zur horizontalen Ebene

Berechnung der Keilvolumina

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

— Keilvolumen = Prismavolumen $\times 0,5$,

— Keilvolumen = (Knochenflächen $A + B$) $\times 0,5 \times$ Keilhöhe $\times 0,5$.

Diese Berechnung diente als Näherungswert, um die prozentualen Unterschiede der Keilvolumen bei den vier verschiedenen Osteotomieformen zu quantifizieren.

Es 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.

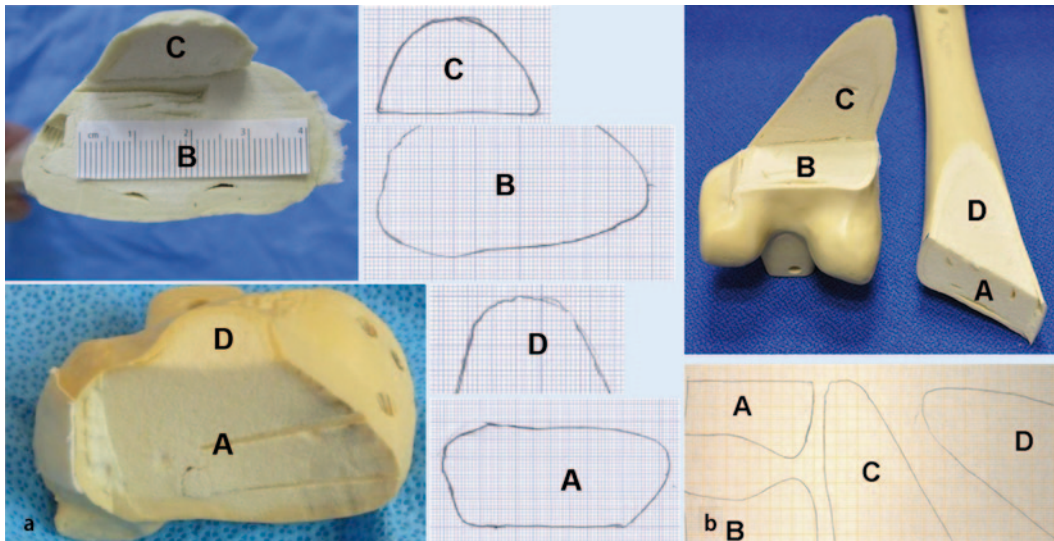


Abb. 2 ▲ **a** Flächen bei aufklappender biplanarer HTO in aufsteigender, V-förmiger Schnittführung im 110°-Winkel (A proximal und horizontal, B distal und horizontal, C ventral und vertikal, D dorsal und vertikal). Die Schnittflächen wurden ermittelt, indem die Knochenränder auf einem Konturenpapier, das die Osteotomieebenen bedeckte, eingekreist wurden. Bei den uniplanaren Osteotomieproben entfielen die vertikalen Flächen C und D (Gruppen HTO 1 und 4). **b** Flächen bei lateral aufklappender und medial schließender Osteotomie, uni- und biplanar (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 2) entfielen die frontalen Oberflächen

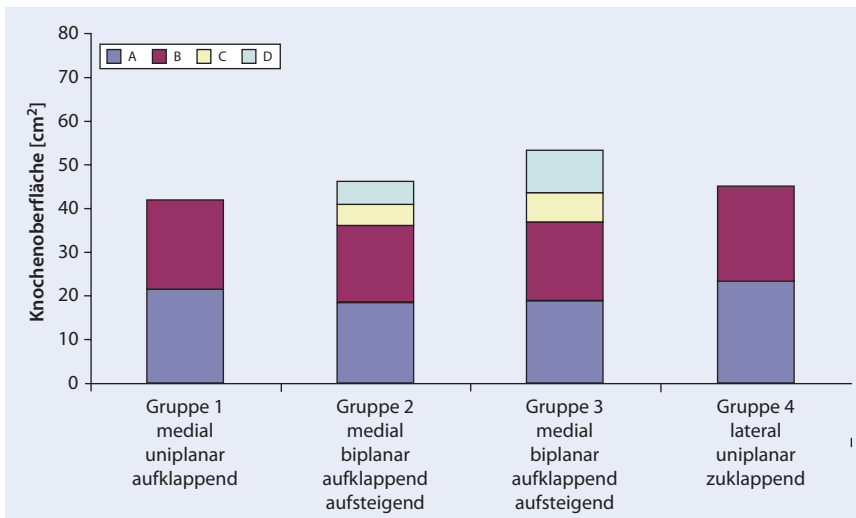


Abb. 3 ▲ Aufsummierung tibialer Flächen (cm²) nach HTO, geschichtet gemäß anatomischer Lokalisation der verschiedenen Osteotomieebenen (A proximal und horizontal, B distal und horizontal, C ventral und vertikal, D dorsal und vertikal)

Das resultierende Prismavolumen wurde halbiert um in Annäherung einen realistischen Wert für das Keilvolumen zu erhalten.

Statistische Auswertung

Ausgehend von einer vorangegangenen Teststärkenanalyse (Teststärke 80%, Signifikanzlevel 5%) wurde die statistische

Auswertung anhand der Daten vorgenommen, die von den 5 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 ver-

gleichen. Dabei wurden Differenzen mit $p < 0,05$ als signifikant betrachtet.

Ergebnisse der HTO-Techniken

Oberflächen der unterschiedlichen tibialen Osteotomieebenen

Die Osteotomien wurden mit einer oszillierenden Säge durchgeführt, deren Sägeblatt eine Dicke von 1,5 mm aufwies. Dementsprechend waren die korrespondierenden Tibiassegmente nach Osteotomie nicht völlig kongruent (Abb. 2a, Tab. 3). 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 [Standardabweichung (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 (SD = 2,9), die Osteotomie-

ebenen C einen mittleren Wert von $6,0 \text{ cm}^2$ ($SD=1,7$).

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-Osteotomietechnik (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 tendenziell größere Knochenoberflächen.

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

Keilvolumina in Abhängigkeit von den HTO-Techniken

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 (Abb. 3, 4, Tab. 4). Wesentlich ist, dass Keilvolumina bedeutend höher waren, wenn die uniplanare aufklappende Technik im Vergleich zu beiden biplanaren Gruppen zum Einsatz kam.

Ergebnisse der DFO-Techniken

Oberflächen der unterschiedlichen femoralen Ebenen

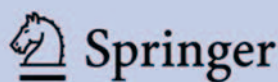
Entsprechend den angewendeten operativen Standardtechniken wurde ein 0,8 mm dickes Sägeblatt für alle horizontalen knöchernen Schnitte verwendet. Demzufolge waren die entsprechenden femoralen Ebenen nicht völlig kongruent, nach-

dem 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 uni- und biplanaren Gruppen gefunden (Abb. 5, 6, Tab. 5). Ein Trend zu größeren frontalen Osteotomieebenen der biplanaren aufklappenden Gruppe (Gruppe DFO 3) wurde gegenüber der biplanaren schließenden Gruppe (Gruppe DFO 4) gefun-

den. Schließlich zeigte die Aufsummierung der femoralen Oberflächen (in mm^2) keinen signifikanten Unterschied innerhalb der uni- und der biplanaren Gruppe. In den biplanaren Gruppen (Gruppen DFO 3 und 4) wurde jedoch eine wesentlich höhere femorale Oberfläche im Vergleich zu den uniplanaren Gruppen festgestellt (Gruppe DFO 1 und 2, ANOVA, $p=0,036$, Abb. 5, Tab. 5).

Die durchschnittlichen Oberflächen der gegenüberliegenden horizontalen

Hier steht eine Anzeige.



Tab. 3 Horizontale und vertikale Osteotomieflächen der Tibiae

	Osteotomieflächen (cm ²)			
	A	B	C	D
Gruppe HTO 1				
Mittelwert	21,6	20,5		
SD	1,3	1,5		
Gruppe HTO 2				
Mittelwert	18,5	17,4	4,8	5,2
SD	2,2	2,1	0,3	0,1
Gruppe HTO 3				
Mittelwert	18,8	17,9	7,2	9,3
SD	1,7	1,6	2,6	3,4
Gruppe HTO 4				
Mittelwert	23,5	21,7		
SD	0,8	1,2		

SD Standardabweichung, *HTO 1* aufklappend uniplanar, *HTO 2* aufklappend biplanar aufsteigend, *HTO 3* aufklappend biplanar absteigend, *HTO 4* zuklappend uniplanar, *A* proximal und horizontal, *B* distal und horizontal, *C* ventral und vertikal, *D* dorsal und vertikal

Tab. 4 Entstandene Keilvolumina nach aufklappenden Osteotomien in Abhängigkeit der Osteotomietechnik und der Keilbasishöhe

	Keilbasishöhe (cm)		
	0,5	1,0	1,5
Gruppe HTO 1: Keilvolumen (cm³)			
Mittelwert	5,27	10,53	15,8
SD	0,34	0,67	1,01
Gruppe HTO 2: Keilvolumen (cm³)			
Mittelwert	4,43	8,97	13,45
SD	0,6	1,07	1,61
Gruppe HTO 3: Keilvolumen (cm³)			
Mittelwert	4,58	9,16	13,73
SD	0,41	0,81	1,22

SD Standardabweichung, *HTO 1* aufklappend uniplanar, *HTO 2* aufklappend biplanar aufsteigend, *HTO 3* aufklappend biplanar absteigend

Schnittflächen waren in der uniplanaren aufklappenden Technik am größten. Eine Abnahme der proximalen Schnittfläche (A) als auch der dorsalen, biplanaren Kontaktfläche (D) bei den uni- wie den biplanaren, schließenden Techniken stand in Bezug zu einem Anstieg in der Keilkorrektur, da der proximale Schnitt mit ansteigenden Keilhöhen zunehmend proximal positioniert wird (Abb. 6, Tab. 5).

Die femorale Oberfläche des biplanaren Schnittes war bei der aufklappenden Technik größer, was durch die proximale Lage des Anfangspunktes des biplanaren Schnittes in Relation zur Gelenklinie zu erklären ist. Mit derselben abfallenden Neigung der Osteotomie muss der Endpunkt des lateralen Schnittes im Vergleich zum medialen, schließenden Schnittes 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 Antekurvations des Femurs.

Keilvolumina in Abhängigkeit von den DFO-Osteotomietechniken

Das Verhältnis der drei ausgewählten Keilvolumina 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 (Abb. 7, Tab. 6).

Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden knöchernen Kontaktflächen und Keilvolumina nach verschiedenen auf- und zuklappenden kniegelenknahen Osteotomietechniken bestimmt. Die gewonnenen Daten zeigen, dass unter den aktuell verwendeten Osteotomietechniken die medial öffnende biplanare Technik mit absteigender Tuberositasosteotomie als HTO sowie die medial schließende biplanare Technik als DFO ideale geometrische Voraussetzungen für die Knochenheilung schaffen.

Insbesondere bei den biplanaren aufklappenden HTO-Techniken beeinflusst das Ausmaß der Achskorrektur die tatsächlich verbleibende Kontaktzone der auf- und absteigenden retrotuberositären Osteotomieflächen. Durch das Aufklappen im intakten lateralen Scharnier der Osteotomie werden diese retrotuberositären Flächen seitwärts voneinander weggeschwenkt, so dass sich bei großem Korrekturbedarf (Keilbasishöhe 15 mm) die tatsächlich verbleibende Kontaktfläche zwischen den Osteotomieflächen der aufsteigenden retrotuberositären Osteotomie wieder um ca. 40% reduzieren.

Bei Korrekturen mit einer Keilbasishöhe von 10 mm reduziert sich die verbleibende Kontaktfläche zwischen den aufsteigenden Osteotomieflächen nur um ca. 10% und bietet wieder günstige geometrische Voraussetzungen für die Knochenheilung. Dieser Effekt der korrekturabhängigen Veränderung der verbleibenden Kontaktflächen ist nach absteigender retrotuberositären Osteotomie durch die größere Gesamtlänge des Schnittes nur sehr gering ausgeprägt. Die horizontale knöchernen Kontaktzone an der Keilspitze im intakten Osteotomiescharnier zeigt bei beiden biplanaren Techniken keine signifikante Differenz.

Zusammenfassend zeigen die erhobenen Daten, dass im Gegensatz zur uniplanaren aufklappenden Technik beide biplanaren aufklappenden HTO-Techniken große Kontaktflächen mit geringeren Keilvolumina schaffen.

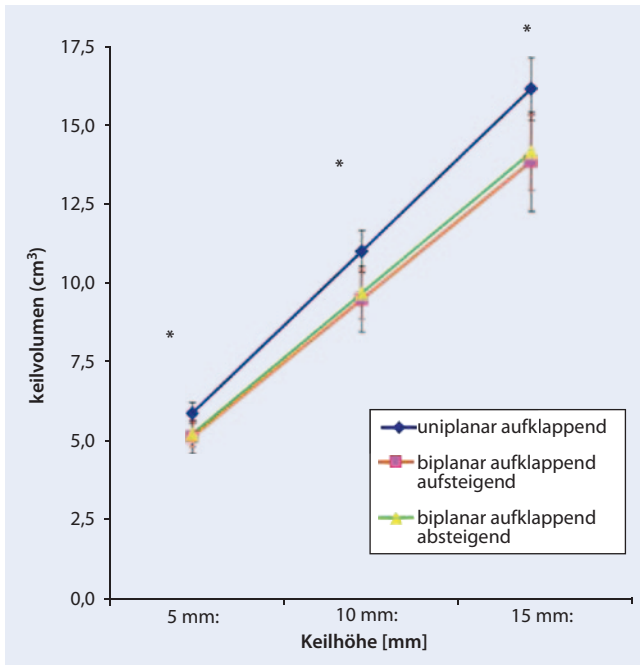


Abb. 4 ◀ Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10 und 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem Keilvolumen (mm³), bei aufklappenden HTO-Techniken ($p < 0,05$)

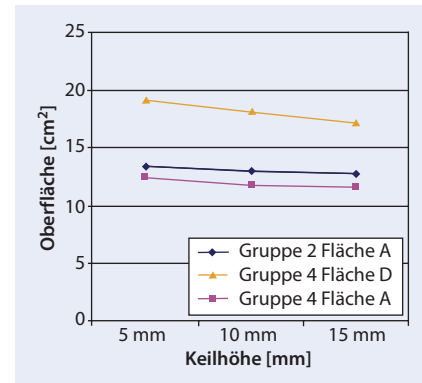


Abb. 6 ▲ Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und berechneter Oberfläche A und D (cm²) bei schließenden uniplanaren (Gruppe DFO 2) sowie biplanaren (Gruppe DFO 4) DFO-Techniken

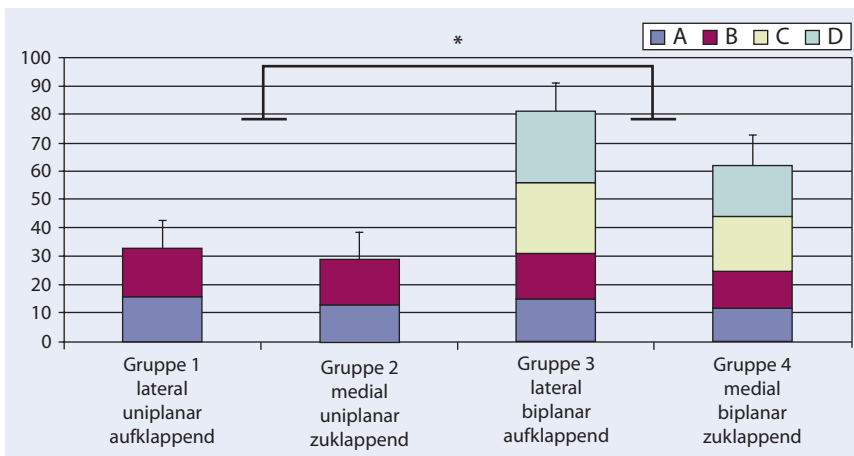


Abb. 5 ▲ Aufsummierung femoraler Flächen (cm²) nach DFO, geschichtet gemäß anatomischer Lokalisation der unterschiedlichen Osteotomieebenen (A proximal und horizontal, B distal und horizontal, C ventral und vertikal, D dorsal und vertikal). Die Keilbasishöhe war standardisiert auf 10 mm. Die Unterschiede der femoralen Flächen zwischen den uni- und biplanaren Gruppen waren signifikant ($*p < 0,05$)

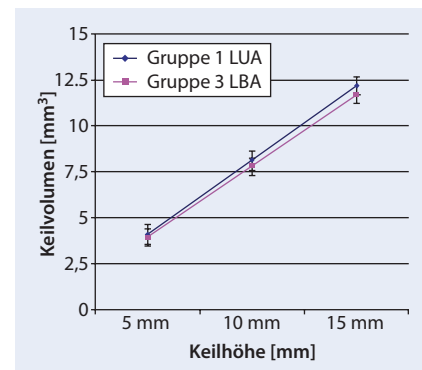


Abb. 7 ▲ Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem Keilvolumen (mm³), bei aufklappenden Techniken. Kennzeichnung der Gruppen: lateral uniplanar aufklappend (LUA) und lateral biplanar aufklappend (LBA)

Für die distale femorale Osteotomie zeigen sich die geometrischen Voraussetzungen nach medial schließender biplanarer DFO-Technik als ideal für die Knochenheilung. Im Vergleich dazu erzeugt die medial schließende uniplanare Technik eine geringere Kontaktfläche. Die lateral öffnende biplanare Technik führt zu einer größeren Spaltbildung. Die lateral öffnende uniplanare Technik vereint alle negativen geometrischen Voraussetzungen für die Knochenheilung: eine geringe

Kontaktfläche mit einer großen Spaltbildung.

Radiologische Langzeitstudien der Knochenheilung nach einer aufklappenden HTO zeigen, dass die Kontaktheilung (primäre Knochenheilung) und die Spaltheilung (sekundäre Heilung über Kallusbildung) gleichzeitig auftreten [29]. In histologischen Studien schritt die Kontaktheilung zügig voran, wenn der Abstand der Knochensegmente $< 0,5$ mm war und die Segmente zueinander stabil fixiert waren [23, 26]. Staubli et al. [30]

konnten in einer radiologischen Untersuchung nachweisen, dass diese Kontaktheilung zwischen den aufsteigenden Osteotomieflächen unter den oben genannten Bedingungen schon 3 Wochen nach der Operation abgeschlossen war.

➤ **Große und eng anliegende Kontaktzonen führen daher zu einer primären und zügigen Knochenheilung.**

Im Gegensatz dazu schreitet die Spaltheilung langsamer voran, da das entstandene Keilvolumen nach aufklappenden Osteotomie zeitaufwendig über die Bildung von Knochenkallus gefüllt werden muss. Daher dauert es bei der Spaltheilung zwischen den aufgeklappten horizontalen Osteotomieflächen mindestens

Tab. 5 Horizontale und vertikale Osteotomieflächen (cm²) der Femurs

Osteotomieflächen (cm ²)										
Gruppe DFO 1 LUA	A			B						
Mittelwert	15,7			17,9						
SD	1,05			0,83						
Gruppe DFO 22 MUZ	A	A	A	B						
	Resezierte Keilhöhe									
	5 mm	10 mm	15 mm							
Mittelwert	13,4	13	12,7	13,6						
SD	0,39	0,32	0,47	0,45						
Gruppe DFO 3 LBA	A			B	C	D				
Mittelwert	14,8			16,3	24,6	25,5				
SD	0,8			0,75	2,19	1,91				
Gruppe DFO 4 MBZ	A	A	A	B	C	D	D	D		
	Resezierte Keilhöhe						Resezierte Keilhöhe			
	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm					10 mm	15 mm
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		

LUA lateral uniplanar aufklappend, MUZ medial uniplanar zuklappend, LBA lateral biplanar aufklappend, MBZ medial biplanar zuklappend, A proximal und horizontal, B distal und horizontal, C ventral und vertikal, D dorsal und vertikal

Tab. 6 Verhältnis zwischen Keilhöhe (5, 10, 15 mm) und nach der Formel für Prismaberechnung berechnetem Keilvolumen (cm³), bei aufklappenden Techniken

	Osteotomieebene		Grundfläche	Keilvolumen (cm ³ , AB/2 x h x 0,5)		
	A (cm ²)	B (cm ²)	AB/2 (cm ²)	h = 0,5 cm	h = 1,0 cm	h = 1,5 cm
Gruppe DFO 1						
LUA			AB/2	x0,25	x0,5	x0,75
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	x0,25	x0,5	x0,75
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

LUA lateral uniplanar aufklappend, LBA lateral biplanar aufklappend, A proximal und horizontal, B distal und horizontal, C ventral und vertikal, D dorsal und vertikal, SD Standardabweichung, h Keilhöhe (cm)

6 Wochen, bis ein Drittel der Keiloberfläche verheilt ist [30]. Die Reduzierung der Keilvolumina verringert daher die Menge an Kallusbildung, die für die Spaltfüllung nach aufklappenden Osteotomie notwendig ist. Bei regelrecht verlaufender Knochenheilung beginnt diese lateral an der Keilspitze im Sinne einer Kontaktheilung und somit am Scharnier der Osteotomie und setzt sich medial zur Keilbasis im Sinne einer Spaltheilung fort [28–30].

Die vorliegende Arbeit weist die folgenden methodischen Schwächen auf: Der Versuchsaufbau idealisiert die Knochengeometrie unter Missachtung von biologischen und mechanischen Faktoren, die ebenfalls Einfluss auf die Osteotomieheilung nehmen können. Die ver-

wendete Formel zur Berechnung der Keilvolumina bietet lediglich Näherungswerte und weist einen systematischen Fehler auf, der jedoch alle verwendeten Knochen in gleicher Weise betrifft. Die Alternative zur Berechnung, nämlich das Füllen des Osteotomiespalts mit Knochenzement zur Bestimmung seines Volumens 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.

Während die Kontaktheilung für die proximale Tibia nach HTO bereits radiologisch nachgewiesen wurde, gibt es für die DFO weder direkte radiologische noch histologische Studien. Die kli-

nischen Erfahrungen lassen jedoch den Schluss zu, dass die Kontaktheilung nach DFO in gleicher Weise voranschreitet wie nach der HTO, wenn die Osteotomie mit winkelstabilen Implantaten fixiert wurde.

Fazit für die Praxis

- Trotz der idealisierten Bedingungen beim vorgestellten Versuchsaufbau am Kunstknochen lässt sich eine generelle Regel für die Knochengeometrie nach kniegelenknaher Osteotomie ableiten: die Vergrößerung der Kontaktflächen bei gleichzeitiger Verkleinerung der Keilvolumina schafft günstige geometrische Voraussetzungen für die Knochenheilung, da die

Flächen der schnellen Kontaktheilung erhöht und die Volumina der lang-samen Spaltheilung gleichzeitig vermindert werden.

- Dieser Effekt wird bei den vorgestellten Techniken nur durch eine biplanare Osteotomieführung erzielt.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. D. Pape

Orthopädische Klinik des Centre Hospitalier de Luxembourg
Akademisches Lehrkrankenhaus der Universitätskliniken des Saarlandes
78, rue d' Eich, 1460 Luxembourg
dietrichpape@yahoo.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Der Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

Open Access. Dieser Artikel unterliegt den Bedingungen der Creative Commons Attribution License. Dadurch sind die Nutzung, Verteilung und Reproduktion erlaubt, sofern der/die Originalautor/en und die Quelle angegeben sind.

Literatur

- Amendola A, Rorabeck CH, Bourne RB, Apyan PM (1989) Total knee arthroplasty following high tibial osteotomy for osteoarthritis. *J Arthroplast* 4:11–17
- Amendola A, Bonasia DE (2010) Results of high tibial osteotomy: review of the literature. *Int Orthop* 34:155–160
- Brinkmann J-M, Hurschler C, Agneskirchner JD et al (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
- Brinkmann J-M, Hurschler C, Agneskirchner JD et al (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
- Engel GM, Lippert FG (1981) Valgus tibial osteotomy: avoiding the pitfalls. *Clin Orthop Relat Res* 160:137–143
- 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 D, Lobenhoffer P, Staubli A, van Heerwaarden RJ (2008) Medial closed-wedge varus osteotomy of the distal femur. *Arthroscopie* 21:6–14
- 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 RD, Sonneveld H, van Heerwaarden RJ et al (2004) Distal tuberosity osteotomy in open wedge high tibial osteotomy can prevent patella infera: a new technique. *Knee* 11:457–461
- Han SB, Lee DH, Shetty GM et al (2011) A “safe zone” in medial open-wedge high tibia osteotomy to prevent lateral cortex fracture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):90–95
- van Heerwaarden RJ, Wymenga AB (2007a) Die suprakondyläre varisierende Femurosteotomie mit speziellem Plattenfixateur. In: Lobenhoffer P, Agneskirchner JD, Galla M (Hrsg) *Kniegelenknahe Osteotomien Indikation Planung Operationstechnik mit Plattenfixateuren*. Thieme, Stuttgart, S 93–106
- 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 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 (Hrsg) *Osteotomies around the knee*. Thieme, Stuttgart, S 147–166
- van Heerwaarden RJ, Najfeld M, Brinkman M et al (2013) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for distal femoral osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):206–212. doi: 10.1007/s00167-012-2127-y
- 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 R, Pagnottelli M, Vadala A et al (2011) Open-wedge high tibial osteotomy: comparison between manual and computer-assisted techniques. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):113–119
- Jacobi M, Jakob RP (2008) High tibial closed wedge osteotomy. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jakob RP (Hrsg) *Osteotomies around the knee*. Thieme, Stuttgart, S 55–69
- Jacobi M, Wahl P, Bouaicha S et al (2011) Distal femoral varus osteotomy: problems associated with the lateral open-wedge technique. *Arch Orthop Trauma Surg* 131:725–728
- Jakob RP, Jacobi M (2004) Die zuklappende Tibiakopfosteotomie in der Behandlung der unikompartimentalen Arthrose. *Orthopäde* 33(2):143–152
- Lobenhoffer P, Agneskirchner JD (2003) Improvements in surgical technique of valgus high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 11:132–138
- Lobenhoffer P, Freiling D (2008) Development of plate fixators: current status and perspectives. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jakob RP (Hrsg) *Osteotomies around the knee*. Thieme, Stuttgart, S 263–270
- Lobenhoffer P, Agneskirchner J, Zoch W. (2004) Open valgus alignment osteotomy of the proximal tibia with fixation by medial plate fixator. *Orthopäde* 33(2):153–160
- Matthews LS, Goldstein SA, Malvitz TA et al (1988) Proximal tibial osteotomy. Factors that influence the duration of satisfactory function. *Clin Orthop Relat Res* 229:193–200
- 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 D, Pfeil C (2000) Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur. *Orthopäde* 29:18–38
- Pape D, Lorbach O, Schmitz C et al (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 D, Dueck K, Haag M et al (2012) Wedge volume and osteotomy surface depend on surgical technique for high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):127–133
- Pape D, Kohn D, Van GN et al (2013) Differences in fixation stability between spacer plate and plate fixator following high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):82–89
- Perren SM (2008) Fracture healing. The evolution of our understanding. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech* 75:241–246
- Puddu G, Cipolla M, Cerullo G et al (2007) Osteotomies: the surgical treatment of the valgus knee. *Sports Med Arthrosc* 15:15–22
- Schallberger A, Jacobi M, Wahl P et al (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 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 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* 21(1):57–63
- Staubli AE (2008) Radiological examination of bone healing after open-wedge tibial osteotomy. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jacobs WC (Hrsg) *Osteotomies around the knee*. Thieme, Stuttgart, S 131–146
- 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
- Staubli AE, De Simoni C, Babst R, Lobenhoffer P (2003) TomoFix: a new LCP-concept for open wedge osteotomy of the medial proximal tibia—early results in 92 cases. *Injury* 34(Suppl 2):55–62
- Visser J, Brinkman JM, Bleys RL et al (2013) The safety and feasibility of a less invasive distal femur closing wedge osteotomy technique: a cadaveric dissection study of the medial aspect of the distal femur. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(1):220–227
- Zhim F, Laflamme GY, Viens H et al (2005) Biomechanical stability of high tibial opening wedge osteotomy: internal fixation versus external fixation. *Clin Biomech* 20:871–876