

Aus dem Institut für Anatomie I  
der Heinrich-Heine-Universität  
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. pol. Svenja Caspers

# Die Makro- und Mikrovaskularisation des Os metatarsale I

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der medizinischen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

**Katharina Klüting**

Düsseldorf, August 2024

aus dem Institut für Anatomie I  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der  
medizinischen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med Nikolaj Klöcker  
Erstgutachter: Prof. Dr. med. Timm Filler  
Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Hakan Pilge

Tag der mündlichen Prüfung: 15. August 2024

meiner Oma gewidmet

*„Ein Traum, ein Traum ist unser Leben  
auf Erden hier.  
Wie Schatten auf den Wogen schweben  
und schwinden wir,  
und messen unsre trägen Tritte  
nach Raum und Zeit;  
und sind (und wissen's nicht) in Mitte  
der Ewigkeit.“*

Johann Gottfried Herder  
(★ 25. August 1744, † 18. Dezember 1803)

# Kurzfassung

Deformitäten im Bereich des Vorfußes gehören zu den häufigsten Erkrankungen des Bewegungsapparates. Eine besondere Rolle spielt hierbei der Hallux-valgus, der die häufigste Pathologie des Fußes darstellt. Die zur Verfügung stehenden chirurgischen Maßnahmen zur Korrektur sind zahlreich. Zu den möglichen Komplikationen der Hallux-valgus-Chirurgie zählt die avaskuläre Osteonekrose, deren Prävalenz in der Literatur sehr divergent beschrieben wird. Die Zahl der Veröffentlichungen zur Vaskularisation der Mittelfußknochen nimmt zu. Jedoch fehlt eine eindeutige Quantifizierung und mikroskopische Analyse der Vaskularisation im ersten Mittelfußknochen des Menschen. In dieser Arbeit wurden die Foramina nutricia von 65 Vorfüßen aus dem Düsseldorfer Körperspenderwesen gemessen, der erste Mittelfußknochen mikroskopiert und das Havers-System an definierten Regionen durch Bildanalyse quantifiziert. Die Vasa nutricia treten typischerweise in den lateralen mittleren Schaft mit zwei definierten sicheren Zonen in den Knochen ein. Zu einem Drittel ist ihr Vorkommen singulär. Des Weiteren wurden Lamellenkörperchen in unmittelbarer Nähe des vaskulären Bündels in der Hälfte der Proben gefunden. Kopf ( $M= 5,78$ ,  $SD = 2,751$ ) und Basis ( $M= 6,90$ ,  $SD = 3,541$ ) des ersten Mittelfußknochens weisen eine deutlich kleinere Dichte an Havers-Kanälen auf, als der Schaft ( $M= 13,08$ ,  $SD = 4,626$ ). Im Schaft dient das Havers-Kanalsystem neben der A. nutricia weitreichend für die arterielle Versorgung. Das Mittelfußköpfchen im Besonderen ist aufgrund der wenigen intraossären Versorgung auf externe lokale Gefäße für die Blutversorgung angewiesen. Demzufolge sind Verletzungen dieser Gefäße am Caput gravierender für die Blutversorgung, als Schädigungen am Schaft oder der Basis, die durch das intraossäre Haverskanalsystem versorgt werden. Weiter liegt die Vermutung nahe, dass die gefundenen Vater-Pacini-Körperchen mit an der Regulation des Blutflusses zum Knochen beteiligt sind. Eine Ablösung des Weichteilmantels kann damit zusätzlich die Blutversorgung zum Mittelfußknochen beeinträchtigen.

# Abstract

Clinical forefoot pathologies are among the foremost musculoskeletal pathologies. Hallux valgus, which is the most common foot deformity, plays a special role here. Surgical procedures are numerous, and osteonecrosis is mentioned frequently among the different side effects. The blonging prevalence data are highly contradictory. The number of publications on vascularization of the metatarsal bones is acceleratedly increasing. However, quantifications and microscopic analyses of the vascularization in human metatarsal bone are lacking. We measured the foramina and vasa nutricia of 65 forefeet from the Düsseldorf body donation program, microscoped the metatarsal bones, and quantified the Havers system at defined positions by image analysis. Vasa nutricia typically occur in the lateral intermediate shaft with two clusters and two safe zones and are singular in approximately one-third of cases. We identified lamellar corpuscles associated with the vascular bundle in approximately half of the specimens. Caput ( $M= 5,78$ ,  $SD = 2,751$ ) and base ( $M= 6,90$ ,  $SD = 3,541$ ) show significantly smaller density of haversian canals in contrast to the corpus with little change in density ( $M= 13,08$ ,  $SD = 4,626$ ). In the shaft, the Haversian system serves beside the local nutritive supply for longer-range blood distribution. The metatarsal head, in particular, depends on extern local vessels because of less transosseous blood supply. Accordingly, distant disturbances may emerge in the base when damage occurs in the corpus, whereas local nutritive disruptions are more likely in the caput. Based on the hitherto undescribed observation for the forefoot, we hypothesize that the Vater-Pacini corpuscles participate in the regulation of the bony blood flow. Detachment of the soft tissue mantle may affect this regulation in addition to the associated disruption of metatarsal vascular supply.

# Abkürzungsverzeichnis

<b>A.</b>	Arterie
<b>Aa.</b>	Arteriae
<b>A. nut.</b>	Arteria nutricia
<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>AVN</b>	Avaskuläre Nekrose
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>C</b>	Celsius
<b>cm</b>	Zentimeter
<b>dest.</b>	destillata
<b>EDTA</b>	Ethylendiamintetraessigsäure
<b>evtl.</b>	eventuell
<b>exCL</b>	extravaskuläre Lamellenkörperchen
<b>FN</b>	Foramen nutricium
<b>g</b>	Gramm
<b>h</b>	Stunden
<b>HE</b>	Hämatoxylin-Eosin
<b>HV</b>	Hallux valgus
<b>HVA</b>	Hallux-valgus-Winkel
<b>IMA</b>	Intermetatarsal-Winkel
<b>K-Draht</b>	Kirschnerdraht
<b>Kap.</b>	Kapitel
<b>LatR.</b>	Laterales Release
<b>Lig.</b>	Ligamentum
<b>Lsg.</b>	Lösung
<b>M.</b>	Musculus
<b>Mm.</b>	Musculi
<b>MBP</b>	Myelin-Basic-Protein
<b>min</b>	Minuten
<b>MIS</b>	Minimally Invasive Surgery - minimalinvasive Verfahren

<b>MTP</b>	Metatarsophalangealgelenk
<b>PBS</b>	phosphate buffered saline
<b>pvLC</b>	perivasculäre Lamellenkörperchen
<b>VE</b>	vollentsalztes Wasser
<b>VPK</b>	Vater-Pacini-Körperchen
<b>s.</b>	siehe
<b>sog.</b>	sogenannt
<b>Tab.</b>	Tabelle
<b>TCVs</b>	transcortical vessels
<b>TH</b>	Anti-Tyrosine-Hydroxylase Antikörper
<b>TMT</b>	Tarsometatarsalgelenk
<b>µm</b>	Mikrometer
<b>z. B.</b>	zum Beispiel

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Makroskopische Anatomie des Os metatarsale I . . . . .	1
1.1.1	Das Os metatarsale I . . . . .	1
1.1.2	Gefäßversorgung des ersten Metatarsalknochens . . . . .	6
1.1.3	Foramen nutricium und die Arteria nutricia . . . . .	8
1.2	Mikroskopische Anatomie . . . . .	11
1.2.1	Lamellen- und Geflechtknochen . . . . .	11
1.2.2	Havers- und Volkmann-Kanäle . . . . .	13
1.2.3	Vater-Pacini-Körperchen . . . . .	14
1.2.4	Propriozeption an Gefäßen . . . . .	18
1.3	Klinische Relevanz des Os metatarsale I . . . . .	20
1.3.1	Krankheitsbild des Hallux valgus . . . . .	20
1.3.2	Klassische offene Operationsmethoden . . . . .	23
1.3.3	Chevron-/Austin-Osteotomie . . . . .	25
1.3.4	Weichteiltechniken . . . . .	25
1.3.5	Minimalinvasive Verfahren . . . . .	28
1.3.6	Komplikation avaskuläre Osteonekrose (AVN) . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>36</b>
2.1	Körperspenderinnen und Körperspender . . . . .	36
2.2	Verwendete Chemikalien, Geräte und Materialien . . . . .	38
2.3	Präparation . . . . .	38
2.3.1	Klinische Vorfußamputation . . . . .	38
2.3.2	Makroskopische Präparation der Metatarsalregion . . . . .	40
2.3.3	Präparation des Os metatarsale I . . . . .	41
2.4	Fotografie des Os metatarsale I . . . . .	42
2.5	Bearbeitung der Knochen . . . . .	42
2.5.1	Entkalkung . . . . .	43
2.6	Histologie . . . . .	43
2.6.1	Hämalaun-Eosin-Färbung . . . . .	44
2.6.2	Elastika-van-Gieson-Färbung . . . . .	45
2.6.3	Azanfärbung nach Heidenhain . . . . .	46

2.6.4	Immunhistochemie . . . . .	48
2.7	Histologische Auswertung . . . . .	48
2.8	Auswertung mit ImageJ . . . . .	50
2.8.1	Zählung der Havers-Kanäle . . . . .	50
2.8.2	Positionsmessung des Foramens . . . . .	50
2.9	Statistische Auswertung . . . . .	52
2.9.1	Auswertung der makroanatomischen Daten . . . . .	52
2.9.2	Auswertung der mikroskopischen Daten . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Auswertung und Ergebnisse</b>	<b>56</b>
3.1	Charakteristika des Os metatarsale I . . . . .	56
3.1.1	Lokalisation Foramen nutricium . . . . .	56
3.1.2	Zonen unter Risiko . . . . .	63
3.2	Die Arteria nutricia . . . . .	65
3.3	Lamellen- und Geflechtknochen . . . . .	68
3.4	Architektur der Blutversorgung . . . . .	70
3.4.1	Havers-Kanäle . . . . .	70
3.4.2	Durchblutung . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>74</b>
4.1	Länge des Os metatarsale I . . . . .	74
4.2	Die Arteria nutricia . . . . .	75
4.3	Propriozeption . . . . .	80
4.4	Havers-Kanäle . . . . .	89
4.5	Knochenstruktur . . . . .	99
4.6	Laterales Release . . . . .	101
4.7	Methodenkritik und Limitationen . . . . .	105
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>110</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>114</b>

## KAPITEL 1

# Einleitung

Eine genaue Kenntnis über die anatomischen Strukturen der Blutversorgung des Os metatarsale I ist für den klinischen Alltag in der Vorfußchirurgie relevant. Bei der Operation des Hallux valgus beispielsweise wird die Anatomie des ersten Mittelfußknochens grundlegend chirurgisch verändert, sodass die Gefahr einer intraoperativen Verletzung wichtiger gefäßführender Strukturen besteht. Zum Schutze dieser werden im Folgenden der Verlauf Arterien, die die ernährende Arterie (A. nutricia) zum ersten Mittelfußknochen abgibt und ihr Eintrittspunkt (Foramen nutricium) in den Knochen erläutert. Für die innere Vaskularisation, die beispielsweise bei einer Osteotomie oder Fraktur des Knochens von Bedeutung ist, werden die gefäßführenden ossären Strukturen, die sog. Havers-Kanäle, näher betrachtet. Das sich daraus ergebende vaskuläre System wird in Hinblick auf die schwerwiegende Komplikation der avaskulären Nekrose des Mittelfußköpfchens nach Hallux-valgus-Chirurgie eingeordnet. Die Frage nach den anatomischen Strukturen, die für den gesunden Zustand der Blutversorgung des Os metatarsale I sorgen, wird auf Vater-Pacini-Körperchen an der A. nutricia erweitert. Thematisiert werden die Funktion dieser an Gefäßen und der Zusammenhang mit der Biomechanik des ersten Mittelfußknochens. Die zentrale Frage ist, durch welche Strukturen das Os metatarsale vital bleibt und daher während einer Operation des Hallux valgus nicht zerstört werden sollten.

### ***1.1 Makroskopische Anatomie des Os metatarsale I***

#### **1.1.1 Das Os metatarsale I**

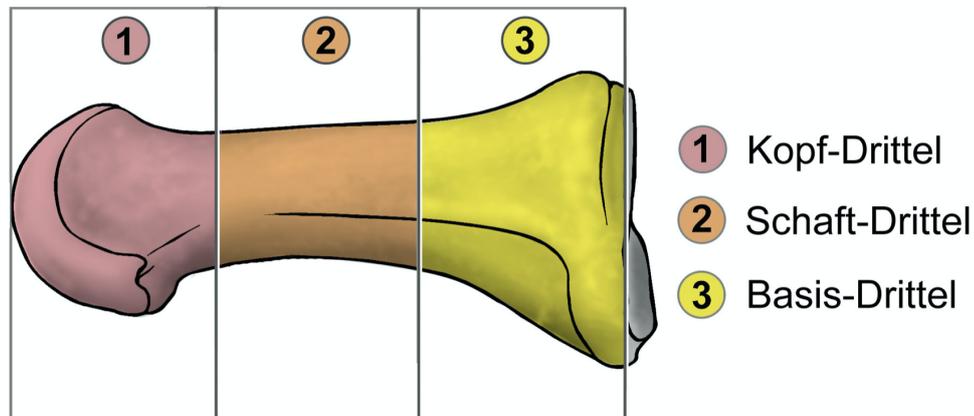
Der erste Mittelfußknochen bildet zusammen mit den weiteren vier Ossa metatarsalia, die insgesamt den kurzen Röhrenknochen zugeordnet werden, den anatomischen Mittelfuß. Nach proximal trennt die sog. „Lisfranc’sche Linie“<sup>1</sup> die Ossa metatarsalia von den Tarsalknochen (Os cuboideum und Ossa cuneiformia). Für die Ossa metatarsalia mitsamt der dazugehörigen fünf Zehen

---

<sup>1</sup>Jacques Lisfranc de Saint-Martin war ein französischer Chirurg [108], der bei Amputationen sich an der tarsometatarsalen Gelenklinie orientierte [195].

wird die Bezeichnung „Vorfuß“ verwendet, sodass bei typischerweise gemeinsam auftretenden Pathologien dieser Strukturen (ausgenommen die jeweiligen Frakturen der einzelnen Knochen) der Begriff „Vorfußdeformitäten“ im klinischen Alltag und in der Literatur verwendet wird. Dabei spielt insbesondere das Os metatarsale I, aufgrund seiner hohen funktionellen Relevanz, eine entscheidende Rolle für die Pathogenese und Ausprägung dieser Deformitäten.

Gemeinsam mit dem fünften Mittelfußknochen stellt das Os metatarsale I eine der relevantesten Strukturen des Längs- und Querbogens des Fußes dar, da diese als sog. „*anteriorer Bogen*“ strukturell am weitesten kaudal bzw. plantarwärts liegen und im Gang und Stand die Auflagepunkte zum Boden sind. Der erste Strahl ist dabei wesentlich an der Aufrechterhaltung des medialen Bogens beteiligt [124, 264]. Er setzt sich aus dem Talus, dem Os naviculare, dem Os cuneiforme mediale und dem ersten Mittelfußknochen mitsamt der beiden Sesambeine zusammen. Dem gegenüber steht die laterale, flache Säule aus Kalkaneus, Os cuboideum, viertem und fünftem Mittelfußknochen. Weiter liegt die gesamte laterale Säule dem Boden auf, während der Weichteilmantel unter dem medialen Bogen physiologisch keinen Bodenkontakt hat [13, 162]. Diese Gegebenheit stellt den Eintritt der äußeren Sehnen und der neurovaskulären Strukturen zum distalen Fuß sicher [124]. Durch den aufrechten Gang des Menschen sind das Fersenbein und die Köpfe der Ossa metatarsalia die höchsten krafttragenden Strukturen des Längsbogens, welcher insgesamt am prominentesten im Großzehenstrahl ausgebildet ist. Die Keilform der Ossa cuneiformia sowie die kraniale Position des Os metatarsale II konturiert hauptsächlich den Querbogen. Der zweite Mittelfußknochen besitzt dabei die geringste Beweglichkeit und wird gemeinsam mit dem Os metatarsale III als statische Zone zusammengefasst. Bei Belastung des Fußes liegt die Hauptlast unter dem zweiten und dritten Mittelfußköpfchen [162]. Im Gegensatz dazu sind der erste und fünfte Mittelfußknochen sehr dynamisch und mobil im Bewegungsablauf integriert, was beispielsweise im Moment der Belastung auf einem Bein hochrelevant ist [162]. Der erste Strahl trägt in der Standphase (im Gang ca. 0,6 Sekunden) einen erheblichen Teil des Körpergewichtes [132, 264]. Als hauptsächlich dynamische Belastungszone wird dieser im physiologischen Zustand mit ca. 1/3 des Körpergewichtes belastet [27, 100, 124]. Im Vorfuß wird dabei das Gewicht gleichmäßig zwischen den Sesambeinen und den restlichen Mittelfußköpfchen getragen [124]. Die beiden Sesambeine im plantaren Weichteilmantel des Os metatarsale I sorgen für eine schonende balancierte Kraftverteilung am ersten Mittelfußköpfchen [264]. Beim Gehen erfolgt die Abrollbewegung des Fußes über den ersten Strahl und auch das Großzehengrundgelenk (Metatarsophalangealgelenk I), wodurch hier ebenfalls eine starke mechanische Beanspruchung besteht [294]. Begleitet wird dies von hoher Druckbelastung in der Abstoßphase des Ganges, worin Kapandji et al. den grundsätzlichen Pathomechanismus in der Entstehung der Arthrose des Grundgelenkes sehen (*Hallux rigidus*) [162].

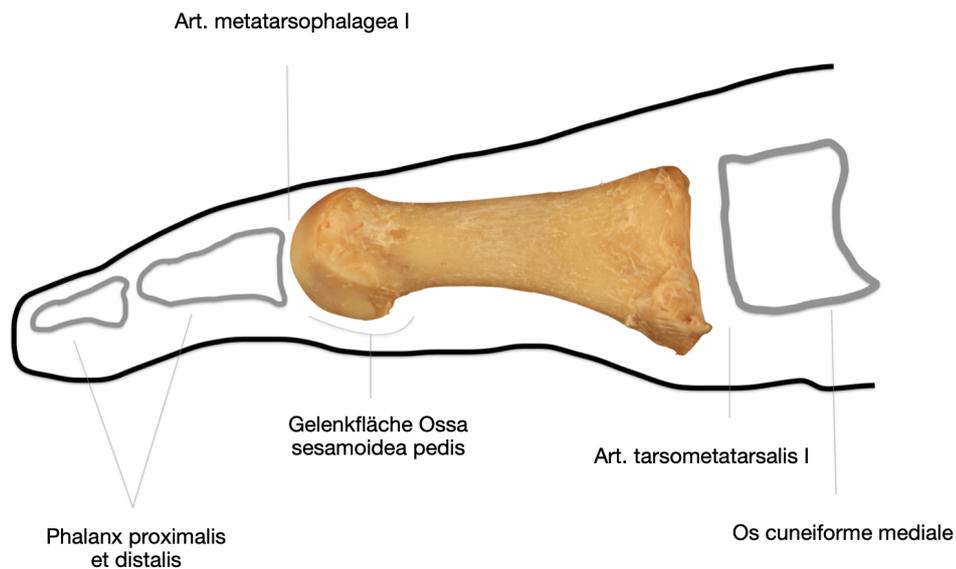


Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

**Abbildung 1.1:** Schematische Ansicht des Os metatarsale I von medial. Einteilung in drei Regionen: Caput (1), Corpus (2) und Basis (3) (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler).

Um diesen mechanischen Anforderungen gerecht zu werden, verfügt das Os metatarsale I über mehrere anatomische Besonderheiten. Nach dem zweiten Metatarsalknochen ist der erste Mittelfußknochen, bezogen auf die relativen Längen der Ossa metatarsalia, je nach Fußform meist der längste Mittelfußknochen [123, 264]. Erster und dritter Metatarsalknochen sind oft gleich lang [141]. Es zeigen sich zudem geschlechterspezifische sowie populationsbasierte Unterschiede in der Länge des Os metatarsale I. Demnach haben Männer insgesamt längere und breitere Mittelfußknochen. Die Länge korreliert dabei positiv mit der Breite der Knochen [358]. Weiter ist das Os metatarsale I in Hinblick auf die mechanische Beanspruchung, im Vergleich zu den übrigen schlankeren Ossa metatarsalia, der stärkste Mittelfußknochen [27].

Ähnlich wie andere kurze Röhrenknochen wird das Os metatarsale I anatomisch in Regionen unterteilt (siehe Abb. 1.1). Der distale, kugelige Anteil des Knochens, der im Metatarsophalangealgelenk mit der Großzehe kommuniziert, wird als „Kopf“ (*Caput*) bezeichnet. Diesem liegt proximal der dreikantige Schaft (*Corpus metatarsale*) an und bildet zum Fußrücken hin eine kantenartige Leiste, die vermutlich (ähnlich zur Tibiakante) als muskulärer Ansatzpunkt fungiert. Die ossäre Leiste der anderen Ossa metatarsalia weist hingegen nach plantar [27]. Insgesamt verfügt der erste Mittelfußknochen über mehr Muskelansätze als die anderen Ossa metatarsalia



**Abbildung 1.2:** Schematische sagittale Ansicht des Os metatarsale I mit den angrenzenden Gelenkflächen (Quelle: eigene Darstellung).

[124]. Als proximaler Anteil des Knochens kommuniziert die Basis des ersten Mittelfußknochens im Tarsometatarsalgelenk mit dem Os cuneiforme mediale. Die dem Metatarsalköpfchen plantar anliegenden Sesambeine sind ligamentär mit der Basis der Großzehe (proximalen Phalanx) verbunden. In dieser ligamentären Struktur finden Fasern des *M. flexor hallucis brevis* ihren Ansatz. Zum medialen plantaren Anteil der Gelenkkapsel ziehen des Weiteren Fasern des *M. abductor hallucis*. Umschlossen wird der sog. *Sesamoidkomplex*, das MTP-Gelenk sowie der Kopf des Os metatarsale I von einer bindegewebigen Gelenkkapsel. Dabei spielt der plantar gelegene Ansatz der Gelenkkapsel eine bedeutende Rolle für die Blutversorgung, da dieser kleinste Gefäße an das erste Mittelfußköpfchen heranführt [296] (s. Kap. 1.1.2).

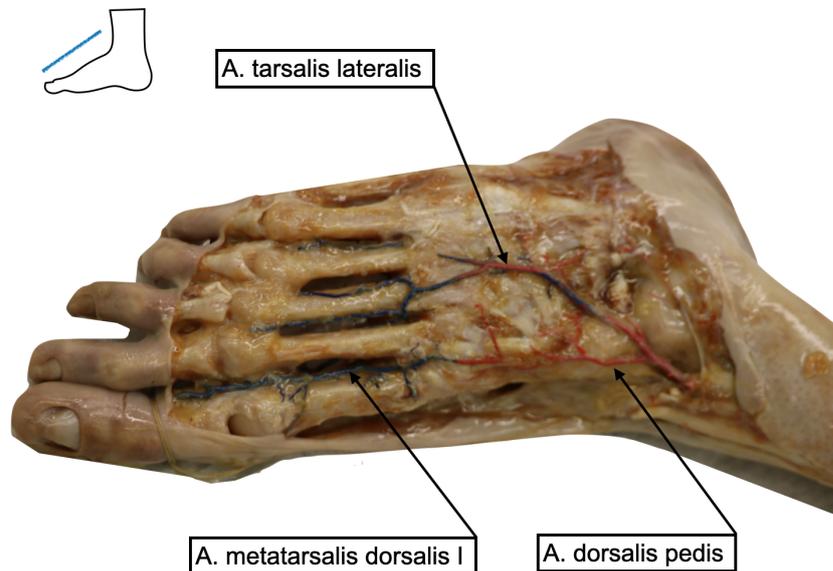
Die beschriebene Anatomie des ersten Mittelfußknochens stellt den Ausgangspunkt jeglicher Pathologien des ersten Strahls dar und Abweichungen dieser den Ansatzpunkt für operative Kor-

rekturen. Dabei ist vor allem eine genaue Kenntnis der physiologischen Stellung erforderlich. Die regelrechte Position der Großzehe ist eine milde Valgusstellung, die auf balancierten Muskelzügen beruht. Am Caput des Os metatarsale existiert kein direkter Muskelansatz [163, 264, 376]. Die Sehnen der Flexoren und Extensoren üben Biegungskräfte auf das MTP- und TMT-Gelenk aus [355]. Verglichen mit den restlichen vier MTP-Gelenken, stellt sich das erste Metatarsophalangealgelenk vom Aufbau her am komplexesten dar. Dies basiert u. a. auf dem Sesamoidkomplex, der sich nur im Bereich des ersten Strahls befindet [163]. Dieser, bestehend aus den beiden Sesambeinen, acht Bändern und sieben Muskeln, wirkt stabilisierend auf die Großzehe [4]. Durch den Sesamoidkomplex besteht eine Verbindung zwischen den ersten beiden Mittelfußknochen [355]. An dieser Stelle wird eine weitere Besonderheit des ersten Mittelfußknochens in der Gelenkfläche zum Os metatarsale II gesehen, was die artikulierende Anatomie mitsamt des genannten Sesamoidkomplexes des Os metatarsale I, neben den anderen Ossa metatarsalia, einzigartig macht [90, 116]. Eine ähnliche stabilisierende Funktion, wie der Sesambeinkomplex, haben die Plantaraponeurose sowie Anteile der Gelenkkapsel [296, 355]. Beide Muskelbäuche des M. adductor hallucis haben ihren Ansatz am lateralen Sesambein und wirken damit auf die Großzehe adduzierend. Für die korrekte Ausrichtung des ersten Strahls sind diese statischen und dynamischen Stabilisatoren notwendig [264].

Beim Gehen erfährt der Vorfuß reaktive Kräfte des Bodens, die mehr als das einwirkende Körpergewicht betragen. Diese wirken über das plantare Gewebe der Großzehe so, dass sich das MTP-Gelenk im möglichen physiologischen Bewegungsausmaß ausrichtet [87]. Eine Fehlbelastung des Vorfußes führt mit der Zeit zur Ermüdung und die einst stabilisierenden Strukturen erschlaffen. Die Um- und Fehlverteilung des Gewichtes im Gang und Stand führen zu Umbauprozessen, die letztendlich das Bewegungsausmaß des MTP-Gelenkes beschränken. Im Hinblick auf die Pathologie und Pathogenese des Hallux valgus (s. Kap. 1.3.1) ist folgende physiologische Anatomie [87] die Grundlage:

- kongruentes Ineinandergreifen der Gelenkflächen zwischen Metatarsalköpfchen und proximaler Phalanx bei repetitiver Gewichtsänderung im Gang
- distale Gelenkfläche des Os metatarsale I und dessen Schaftachse stehen physiologisch zueinander
- Weichteilmantel um das MTP-Gelenk ist vollumfänglich kompakt
- stabiles TMT-Gelenk

Eine Dysfunktion des ersten Strahls hat weitreichende Auswirkungen mit mehreren pathologischen Deformitäten als Folge: z. B. die erworbene Plattfußdeformität, Charcot-Marie-Tooth-Krankheit, Hallux rigidus, zentrale Metatarsalgie und den Hallux valgus [100]. Der Einfluss des



**Abbildung 1.3:** Anatomie des dorsalen Fußes. Präparation zur Darstellung der dorsalen Fußarterien. Vorherige Färbung der Arterien mittels Latex-Injektion an einer nach *Thiel* fixierten Körperspende (Quelle: eigene Darstellung).

ersten Strahls auf den Fuß und das gesamte Gangbild kann dramatisch sein, wodurch eine ausreichende Kenntnis über die Anatomie für Diagnose und Therapie im klinischen Alltag eine hohe Relevanz hat.

### 1.1.2 Gefäßversorgung des ersten Metatarsalknochens

Der erste Metatarsalknochen sowie das anliegende Metatarsophalangealgelenk erhalten insgesamt aus drei Gefäßen Blut zur Versorgung [82, 286]:

- A. metatarsalis dorsalis I
- A. metatarsalis plantaris I
- A. plantaris medialis

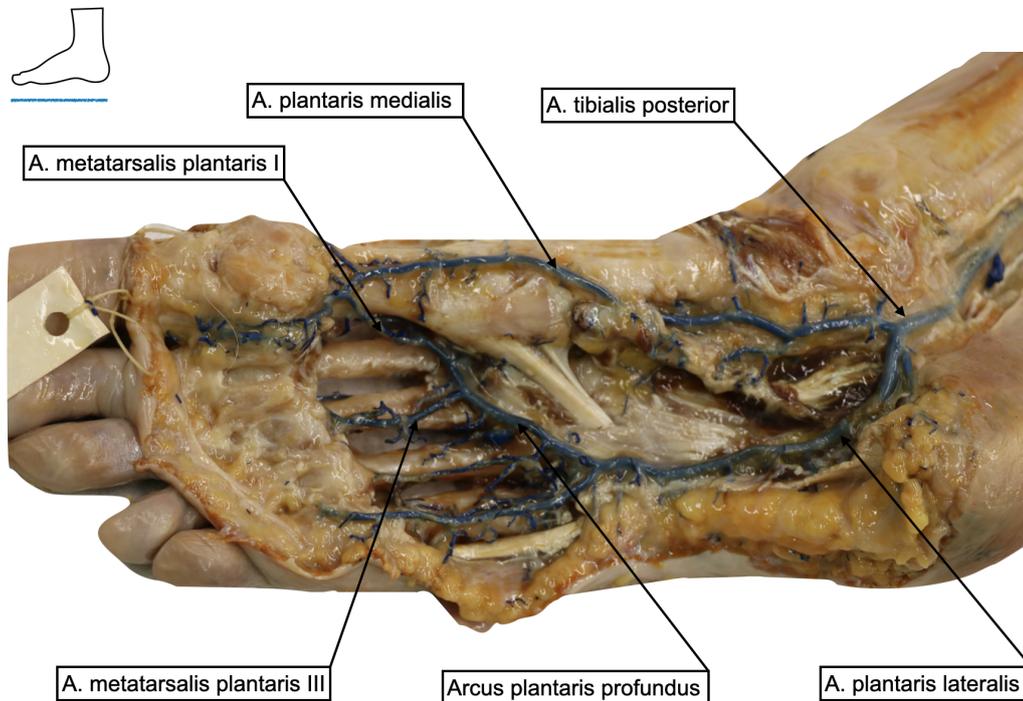
Dabei entspricht die erstgenannte, und für das Os metatarsale I relevante Metatarsalarterie, der Fortführung der Arteria dorsalis pedis (s. Abb. 1.3). Die weiteren vier Metatarsalarterien gehen aus der A. arcuata, einem Ast der A. dorsalis pedis, hervor. Die fünf Metatarsalarterien

laufen im jeweiligen Intermetatarsalspalt nach distal und bilden in ihrer Endstrecke dorsale Äste für die jeweilige Zehe. Ihr Verlauf kann dabei entweder oberflächlich, mitten in den dorsalen Musculi interossei oder in der Tiefe des Weichteilmantels sein.

Feinste Äste ziehen von der ersten Arteria metatarsalis dorsalis zur angrenzenden Muskulatur und zu den einzelnen Abschnitten des ersten Mittelfußknochens. Dabei erhält der Kopf des Mittelfußknochens im Durchschnitt einen bis drei versorgende Äste [301]. Zum Schaft und zur Basis sind es im Vergleich nur ein bis maximal zwei Äste. Das Metatarsalköpfchen verfügt somit über eine ausgeprägte extraossäre Blutversorgung [158]. Von den beschriebenen Ästen der Kopffregion verzweigen sich nochmals kleinste Gefäße zu der angrenzenden Gelenkkapsel. Auf diese Weise stellt die A. metatarsalis dorsalis die Hauptquelle der Blutversorgung für die laterale und dorsale Gelenkkapsel dar. Allgemein wird die Gelenkregion hauptsächlich durch Äste der A. metatarsalis dorsalis versorgt, wobei der dorsale und laterale Teil des Gelenkes eine deutlich höhere Anzahl an Ästen erhält. Insgesamt präsentiert sich demnach ein kompaktes vaskuläres Netz, das sich um die Gelenkkapsel legt, die Kapsel durchdringt und die Gefäße dann mit dem intraossären Gefäßsystem kommunizieren lässt [301]. In den meisten Fällen entspringt aus der ersten A. metatarsalis dorsalis die A. nut. des ersten Mittelfußknochens [210, 301].

Neben der genannten ersten dorsalen Metatarsalarterie spielt ihr plantares Korrelat, die A. metatarsalis plantaris, ebenfalls eine Rolle bei der Blutversorgung des ersten Mittelfußknochens (s. Abb. 1.4). Vom Arcus plantaris profundus stammend, zieht diese unterhalb der interossären Muskulatur nach distal und gibt dabei zwei Äste zum Schaft und mindestens einen zur Basis des Os metatarsale I ab [301]. Ein bis zwei weitere Äste versorgen die bereits erwähnte plantare und auch laterale Gelenkfläche des Metatarsophalangealgelenks, dafür aber nicht die dorsalen Aspekte des Gelenks. In Zusammenhang mit der Arteria metatarsalis plantaris bestätigten Shereff et al. die Existenz einer Gefäßkreuzung am Hals des ersten Mittelfußknochens [301]. Diese entsteht in 69% der untersuchten Proben durch eine Verbindung zwischen der ersten A. metatarsalis plantaris und einem oberflächlichem Ast der A. plantaris medialis. Auch aus der plantaren ersten Metatarsalarterie kann die A. nut. des Os metatarsale I ihren Ursprung finden [277]. Ein oberflächlicher und ein tiefer Ast der A. plantaris medialis verlaufen medial und lateral um den ersten Mittelfußknochen. In 75% der 13 von Shereff et al. untersuchten Proben ließ sich der oberflächliche Ast der A. plantaris medialis nachweisen, der weitere nicht stetig nachweisbare Gefäße zum ersten Mittelfußknochen abgibt. Ebenfalls ein bis zwei Versorgungsäste zum Kopf des Os metatarsale I konnten in neun Proben identifiziert werden, die zugleich die Gelenkregion mit einschlossen [301].

Von allen drei genannten Arterien ziehen kleine Äste zum Periost sowie zur Gelenkkapsel und versorgen diese mit Blut. Zusammengefasst wird der erste Metatarsalknochen durch die von lateral eintretende Arteria nut., von periostealen Gefäßen an der Gelenkkapsel und von



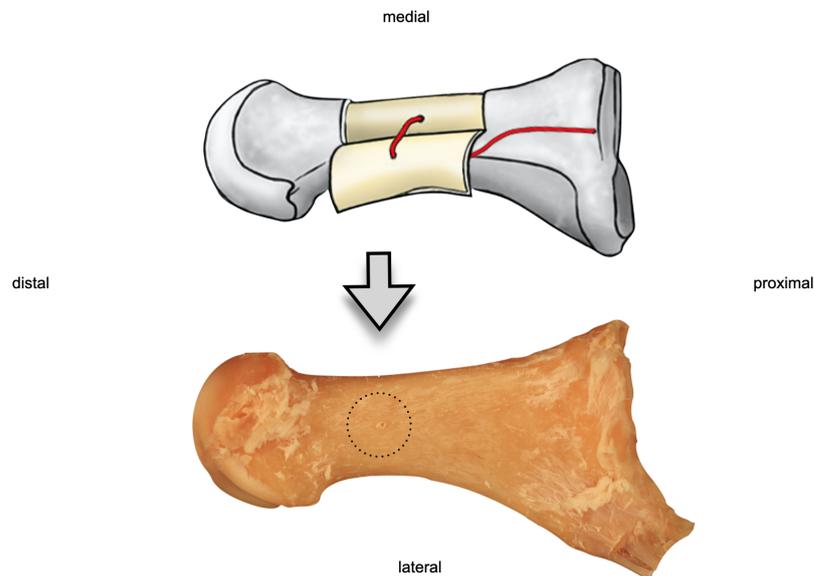
**Abbildung 1.4:** Anatomie des plantaren Fußes. Präparation zur Darstellung der metatarsalen Arterien. Vorherige Färbung der Arterien mittels Latex-Injektion an einer nach *Thiel* fixierten Körperspende (Quelle: eigene Darstellung).

Kapselgefäßen versorgt [180]. Entscheidend für die Blutversorgung des Caputs ist der Plexus, der sich an der Plantarseite unmittelbar proximal der Kapselinsertion befindet [82, 210, 277].

### 1.1.3 Foramen nutricium und die Arteria nutricia

Innerhalb der Knochen des menschlichen Körpers finden unterschiedlichste Prozesse statt (Hämatopoese, Calciumhomöostase, *Remodeling*, Knochenheilung, Knochenwachstum), die eine enge Verbindung zum Gefäßsystem unerlässlich machen [10, 46, 171, 206–208, 232, 314]. Durch die täglich einwirkende Belastung auf die Knochensubstanz, und die damit einhergehenden altersbedingten Effekte, ist für die Nährstoffversorgung und Zellrekrutierung in das Knochengewebe eine adäquate intraossäre Blutzirkulation notwendig [206, 262].

Um dies zu gewährleisten, existieren zu- und abführende Blutgefäße am Knochen, die als *Vasa nutricia* bezeichnet werden [83, 169]. Die sog. Arteria nutricia stellt hierbei, vor allem in



**Abbildung 1.5:** Ansicht auf das Os metatarsale I von lateral. Oben: Zeichnung der A. nutricia (rot) im präparierten, abgelösten Weichteilmantel. Unten: Foramen nutricium (Kreis) nach Entfernung des Weichteilmantels (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler).

der Wachstumsphase, die hauptsächliche Quelle für die Blutversorgung dar [256]. Der Zugang des Blutes zum Knochen erfolgt über die Diaphyse, in die die Arteria nutricia über das *Foramen nutricium* bei Mensch und Säugetieren den direkten Zugang durch das kompakte Knochengewebe findet (s. Abb. 1.5). Payton et al. beschreiben, dass das Foramen nutricium an jedem Knochen eine bestimmte Position besitzt [258]. Interessanterweise kann sich die Position des Foramen nutriciums während des Wachstums ändern [133]. Grundlage dessen ist die Hypothese, dass im Wachstum die Richtung der A. nutricia vom wachsenden Knochenende weggerichtet ist [3, 6, 240, 244, 310]. Schwalbe et al. postulieren mit ihrer „*Periosteal Slip-Theorie*“, dass die Richtung des Foramen nutriciums vor der Geburt zunächst horizontal ausgerichtet ist. Dies beruhe auf der Tatsache, dass das Wachstum an den beiden Enden eines langen Knochens vor Bildung der Epiphysen gleich ist [298]. Eine andere Theorie beschreibt, durch die asymmetrische Entwicklung der Skelettmuskulatur, ziehende Kräfte am Periost, die folglich zur Verschiebung des Foramens führen können [182].

Nach abgeschlossener Reifung tritt die Arteria nutricia in einem Winkel zwischen 45° und 60° durch das Foramen nutricium schräg in den Knochen ein und verläuft zunächst durch die Kompakta zum Markraum, wo sie entlang der Längsachse zentrale Arterien bildet [337]. Von diesen aus treten dünnwandige Arteriolen radiär in den Cortex ein [10, 197, 240]. Auf diese Weise wird der kortikale Knochen von einem medullären Gefäßsystem versorgt, das durch die Anastomosierung zwischen Ästen der A. nutricia und metaphysären sowie epiphysären Arterien unterstützt wird [41, 42].

Ein weiteres arterielles System zur Blutversorgung des kortikalen Knochens wurde 1992 von de Saint-Georges und Miller charakterisiert. Demnach versorgen Gefäße des Periostes die oberflächlichen Schichten der Kortikalis und geben Äste ins Knochenmark ab [78]. Anastomosen zwischen dem System des Periostes und der A. nutricia sind dabei häufig [10]. Weiter wird die Diaphyse durch ein peripheres Gefäßnetzwerk des Periostes, welches sich auf die äußeren Schichten der Kortikalis beschränkt, unterstützt [43, 83]. Periphere, metaphysäre Arterien sorgen hingegen für die Blutversorgung des Knochenmarks und die der Kortikalis [262]. Wesentlich anders zu betrachten sind die Gefäße der Epiphyse, die zum einen durch die Präsenz und Nähe zum Knorpelgewebe der Wachstumsfuge autonom sind, und zum anderen von metaphysären Arterien mit versorgt werden [240, 288, 359]. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass ca. 70 % der Perfusion der A. nutricia für die Versorgung des kortikalen Knochens und ungefähr 30 % für den Markraum genutzt werden [197]. Knochen stellen damit ein allgemein stark vaskularisiertes Gewebe dar, welches ca. 10–15 % des Ruhe-Herzzeitvolumens einnimmt [336].

Bezogen auf die intraossäre Versorgung des ersten Mittelfußknochens stammt die A. nutricia in den meisten Fällen aus der ersten A. metatarsalis dorsalis oder aus der A. metatarsalis plantaris [277, 337]. Neben der Arteria nutricia sind das arterielle System des Periostes und die extrakapsulären Gefäße zu nennen [301]. Diese Gegebenheiten wurden von Shereff et al. durch eine vaskuläre Injektionstechnik mit anschließender Aufhellungsmethode nach *Spalteholz* anschaulich beschrieben. Sie schildern einen periostalen Plexus entlang der Diaphyse, der von kleinen Ästen der ersten A. metatarsalis dorsalis, der A. metatarsalis plantaris sowie einem oberflächlichen Ast der A. plantaris medialis gespeist wird (s. Kap. 1.1.2). Nach Eintritt dieser Plexusäste durch die Kortikalis des Knochens anastomosieren sie mit proximalen Gefäßästen der A. nutricia. Diese tritt durch das Foramen nutricium meistens an der lateralen Kortikalis der distalen bis mittleren Diaphyse in den Knochen ein [118, 232]. Shereff et al. zeigten an ihren Spalteholz-Präparaten, dass die A. nutricia sich kurz nach Eintritt in den Knochen in zwei prominente Äste aufzweigt. Dabei verläuft einer jener Äste proximal zur Basis und anastomosiert innerhalb dieser mit Ästen der proximalen Metaphyse [301]. Ein kürzerer Ast zieht zum Kopf des Os metatarsale I und anastomosiert dort mit Gefäßen des Caputs und der Metaphyse [277].

In ihren Proben konnten Shereff et al. zwei bis vier Arterien nachweisen, die die Metaphyse an allen vier Seiten perforieren und unterschiedlichste Anteile des Kopfes versorgen. Die dorsalen 2/3 des Kopfes werden dabei von zwei arteriellen Gefäßen der Metaphyse versorgt, die an der dorsalen Seite medial und lateral in den Kopf eintreten. Von plantar wiederum treten zwei Äste von kleinerem Kaliber hinzu, um das plantare Drittel des Kopfes zu ernähren. Der laterale und mediale Anteil des Kopfes erhält zusätzlich vier bis sechs Arterien, die seitlich in die gelenkfreie Fläche des Kopfes eindringen und mit den bereits beschriebenen Gefäßen anastomosieren [301].

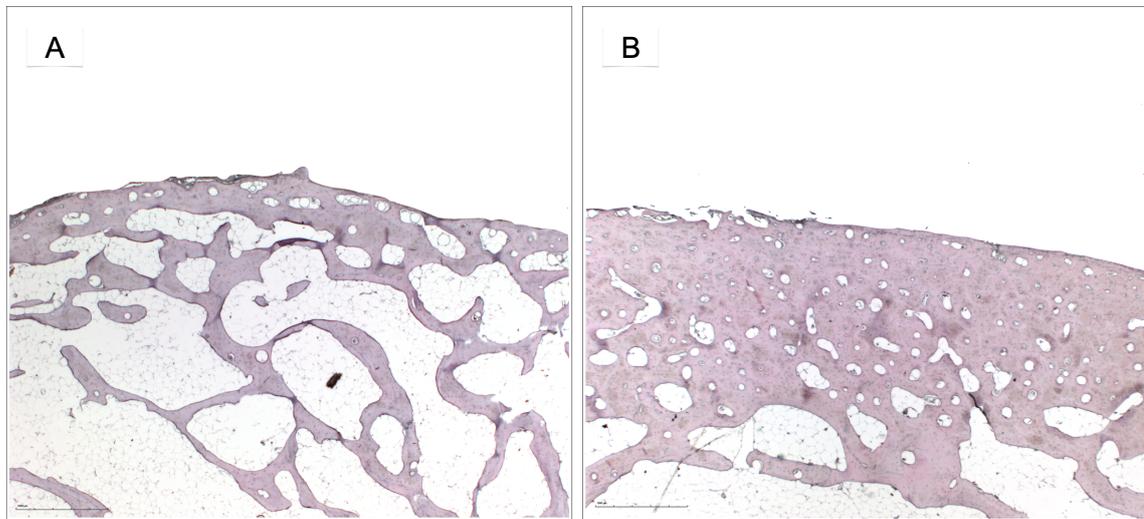
Hinsichtlich der klinischen Tätigkeit ist die Kenntnis über die Lokalisation des Foramen nutricium intraoperativ, zur Vermeidung von Blutungen und Unterbrechung der Durchblutung, relevant [83, 232, 240, 241, 274, 281]. Eine Verletzung der Gefäße durch ein Trauma oder eine intraoperative Dissektion führt allgemein zu einem schlechten Outcome des Heilungsprozesses [7, 49, 171, 240, 241, 310, 369]. Auch das Verständnis über die intraossäre Vaskularisation, zur Vermeidung von avaskulären Nekrosen, wird als hochrelevant betont [253]. Der Schwerpunkt in der Literatur liegt jedoch auf Untersuchungen der Foramina nutricia an langen Röhrenknochen und ihrer klinischen Bedeutung [171, 240, 241, 274]. Studien zum Foramen nutricium der Ossa metatarsalia sind rar [5, 232].

## 1.2 Mikroskopische Anatomie

### 1.2.1 Lamellen- und Geflechtknochen

Zwei Arten von Knochengewebe sind im menschlichen Skelettsystem zu unterscheiden: der Lamellen- und Geflechtknochen. Letzterer wird auch als unreifer primärer Knochen bezeichnet. Er entsteht während der Fetalperiode in vier spezifischen Stadien aus mesenchymalem Bindegewebe und während des Knochenwachstums, bei der desmalen Ossifikation, aus dem Periost [300]. Die Bauweise dieses Knochens ist im Vergleich zum Lamellenknochen unstrukturierter und netzartig (siehe Abb. 1.6). Kollagenfasern sind im Geflechtknochen feinfaserig und zufällig ausgerichtet [360]. Der Geflechtknochen hat einen höheren Wassergehalt und ist gegenüber dem Lamellenknochen weniger mineralisiert, wodurch er biege- und zugfest ist [215].

Im Zusammenhang mit der Knochenneubildung (z. B. im Rahmen der Frakturheilung) ist der Geflechtknochen bedeutend, da diesem eine initiierende Funktion der Synthese zugesprochen wird. Sobald diese geflechtartige Knochensubstanz an einer Stelle des Skelettes vorhanden ist, dient sie als Gerüst für die Bildung von Lamellenknochen. Ist diese abgeschlossen, wird der Geflechtknochen von Osteoblasten entfernt [300]. Daher befindet sich der Geflechtknochen hauptsächlich in schnell wachsenden Knochen [73]. Beim erwachsenen Menschen ist der primäre Knochen noch in den Schädelnähten, im Os temporale, einigen Sehnenansätzen sowie in der Alveolarwand des Ober- und Unterkiefers vorhanden [224].



**Abbildung 1.6:** Histologische Darstellung von Knochengewebe des Os metatarsale I nach Entkalkung und HE-Färbung; erkennbare dichte Kompakta mit darunterliegender Spongiosa. A: Art Geflechtknochen, B: typischer Lamellenknochen (Quelle: eigene Darstellung).

Der Lamellenknochen wird hingegen als sekundärer und reifer Knochen bezeichnet und ersetzt, mit Ausnahme der oben genannten Regionen, vollständig den Geflechtknochen. Er ist biomechanisch sehr stabil, denn er besteht aus systematisch angeordneten Lamellen, die zur Längsachse der Knochenrinde verlaufen [130]. Dabei stellt das Osteon die Grundeinheit dar (s. Kap. 1.2.2). Dieses wird aus ca. 4-20 konzentrisch angeordneten Lamellen aus Kollagenfasern gebildet, zwischen denen die Osteozyten liegen [261]. Aus eng nebeneinanderliegenden Osteonen und den dazwischenliegenden Schaltlamellen bildet sich die dicht strukturierte Kortikalis bzw. Kompakta. Lamellenknochen haben durch die Anordnung und die Richtung der Lamellen eine organisierte Struktur, wodurch diese dem Geflechtknochen in Hinsicht auf die Stabilität überlegen sind [73].

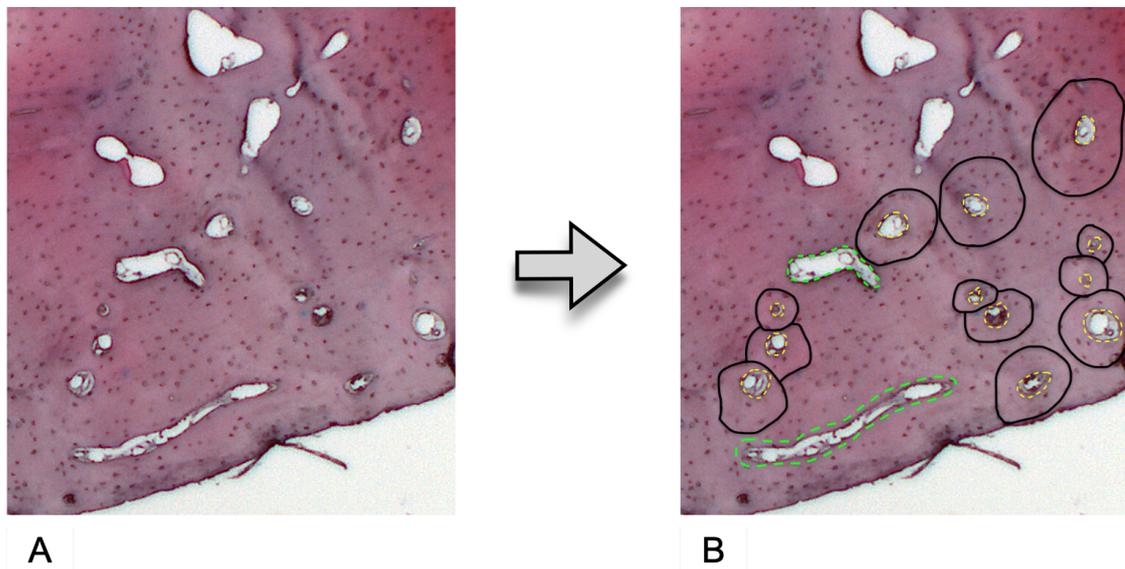
Die jeweilige Differenzierung des Knochengewebes wird beeinflusst von biomechanischen und molekularen Faktoren [300]. Bei mechanischer Belastung wird die Bildung von Geflechtknochen als physiologische Anpassungsreaktion initiiert [73]. Aus diesem Grund ist an biomechanisch hoch beanspruchten Körperregionen zunächst Geflechtknochen vorhanden. Die durch einwirkende Spannung entstehende Kaskade, mit Lamellenknochen als endgültiges Produkt, beruht auf Expression unterschiedlicher molekularer Strukturen. In einer Studie konnte nach einer Stunde mechanischer Belastung zwischen Lamellen- und Geflechtknochen eine unterschiedliche Expression von 395 Genen (codierend für Osteogenese, Angiogenese, Immunreaktion, *Remodeling*) festgestellt werden [220]. Die Menge des entstehenden Geflechtknochens ist dabei unabhängig von

der Stärke der ausgeübten Belastung [341]. Der Übergang von Geflecht- zu Lamellenknochen ist ein stringenter Ablauf ohne intermediäre strukturelle Zwischenstufen von Gewebe [300]. Kumuliert stellt die biomechanische Gewebeanpassung des Knochens einen stets dynamischen Prozess dar.

### 1.2.2 Havers- und Volkmann-Kanäle

Die A. nutricia verläuft durch die Substantia compacta in den Markraum und versorgt diesen sowie die spongiösen Anteile des Knochens mit Blut. Vom Markraum aus ziehen einige Gefäße zurück in die Kortikalis und geben kleinste Gefäße ins Zentrum eines Osteons ab (*Havers-Gefäße*) [130]. Durch die zylindrische Bauweise der Knochenlamellen (*Speziallamellen*) bildet sich ein längsverlaufendes System um die Gefäße [74, 134], welches mit dem Wachstum des Gefäßnetzwerkes voranschreitet [127, 190]. Dabei wird die zentrale Einheit der Osteone als *Havers-Kanal* bezeichnet. Die Lamellen müssen nicht immer kreisförmig konzentrisch um den Havers-Kanal verlaufen, sondern zeigen auch eine spiral- oder mondsichelförmige Konfiguration als sog. *Teil-lamellen* [135, 231, 261], wodurch die Form der Osteone ebenfalls variiert [56, 207]. Mit einem Durchmesser von 20-30  $\mu\text{m}$  beinhaltet ein Havers-Kanal Kapillaren, Nerven, die postkapilläre Venole und kleine Arteriolen [169, 192]. Dabei sind insgesamt 1-2 (selten 3) Blutgefäße in lockerem Bindegewebe eingebettet [263]. Durch die Gefäßabzweigungen, die aus dem Havers-Kanal austreten, ergeben sich Querverbindungen zu anderen Havers-Kanälen (s. Abb. 1.7). Diese Gefäßäste ziehen quer verlaufend durch die Knochenstruktur zum nächsten Havers-Kanal ohne konzentrisch umgebende Knochenlamellen [74, 146, 169]. Die quer verlaufenden Einheiten sind sog. *Volkmann-Kanäle* [74, 354], die in der aktuellen Literatur eher als Ergebnis einer lateral ausgerichteten Resorption von Havers-Kanälen und weniger als eigenständige Entität verstanden werden [207]. Dieses geordnete Gefäßsystem ist im Lamellen- jedoch nicht im Geflechtknochen vorzufinden. Zudem existiert es noch nicht im unreifen kindlichen Knochen und nicht an Frakturstellen [10]. Insgesamt ergibt sich damit ein intraossärer Gefäßbaum innerhalb der Substantia compacta, der hauptsächlich den Knochen longitudinal, aber auch schräg oder spiralförmig durchzieht [206]. Neuere anatomische Untersuchungen zeigen eine unterschiedliche Morphologie der Havers-Systeme, die sich gruppiert, miteinander verbunden bis verzweigt darstellen können [169, 206, 231, 259, 325]. Mithilfe von Mikro-Computertomografie wird die Verzweigung der Havers-Kanäle in mehrere Typen unterteilt [206]:

- Typ I = laterale Verzweigung
- Typ II = dichotome Verzweigung
- Typ III = Verzweigung nach intraosteonalem Umbau



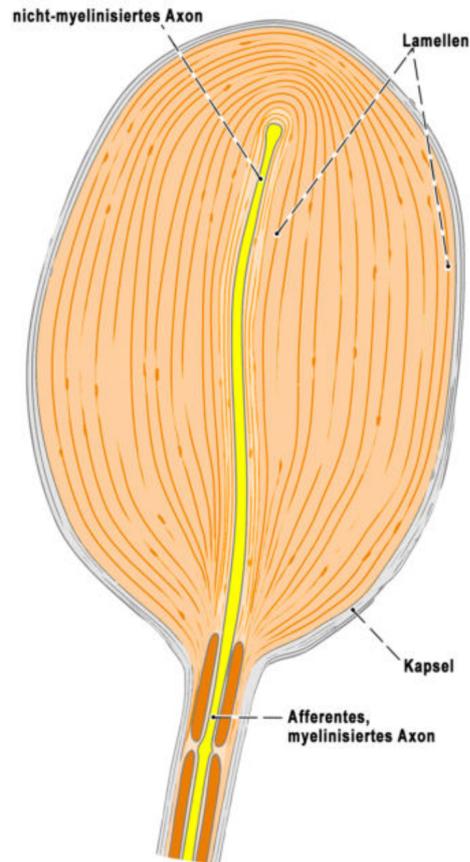
**Abbildung 1.7:** A: Knochenhistologie in HE-Färbung; B: eingefügte Markierungen; schwarz: Osteon; grün: Volkmann-Kanal; gelb: Havers-Kanal (Quelle: eigene Darstellung).

Aus Untersuchungen zum *Remodeling* konnte die Beziehung zwischen Osteozyten und Blutgefäßen genauer beschrieben werden. Für optimale ossäre Umbauprozesse ist alle 600  $\mu\text{m}$  ein Havers-Kanal notwendig [54]. Dabei kann die Kanalgröße als Index für die Umbauaktivität im Knochen genutzt werden. Insgesamt wird von einer hohen Plastizität des Kanalnetzwerkes mit hoher Anpassungsfähigkeit an veränderte hämodynamische Bedingungen ausgegangen [56, 74, 217, 259, 262, 263]. Zusätzlich wird die Knochenarchitektur auf mikrostruktureller Ebene nicht nur durch das Ausmaß, sondern auch durch die Druck- oder Zugart der lokalen Belastung beeinflusst [38, 69, 207, 208, 217]. Demnach konnte nachgewiesen werden, dass sich Osteone parallel zur Belastungsrichtung ausrichten [15, 185, 260]. De Margerie et al. beschrieben weiter, dass die Torsionsbelastung auf den Knochen zu zirkulären Lamellen führt (Havers-Kanäle), wohingegen durch Druck-, Zug- oder Biegekräfte mehr Längskanäle resultieren [77].

In der Literatur wird das Havers-System inklusive der Osteone als Grundstruktureinheit des menschlichen kortikalen Knochens zusammengefasst und hat als solches Einzug in mehrere aktuelle Forschungsbereiche gefunden.

### 1.2.3 Vater-Pacini-Körperchen

Zur Informationsvermittlung zwischen Umwelt und Körper besitzt die menschliche Haut mehrere spezifische Sinneskörper zu denen, neben Chemo-, Thermo- und Nozirezeptoren, die große



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler.

**Abbildung 1.8:** Schematische Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchen im Längsschnitt mit zentralem Axon.

Gruppe die Mechanorezeptoren zählt. Je nach Hautschicht liegen unterschiedliche Rezeptoren vor, die entweder Oberflächen- oder Tiefensensibilität (Propriozeption) vermitteln und unter dem Begriff *somatische Sensibilität* zusammengefasst werden. Diese ist durch den Informationsfluss, zusammengesetzt aus Lage des Körpers im Raum, Stellung der Gelenke und Spannung der muskulären Strukturen, für den Bewegungsapparat essenziell. Sie wandeln einen mechanischen Reiz in ein neuronales Signal zur Weiterleitung an das zentrale Nervensystem um [311]. Die genannten Sinneskörper besitzen einen komplexen Aufbau mit einer neuronalen, einer Glia- sowie Bindegewebskomponente. Zu den Mechanorezeptoren gehören die Merkelzellen, Meissner-Tastkörperchen, Ruffini-, Golgi-Mazzoni- und Vater-Pacini-Körperchen. Mit Ausnahme der Mer-

kelzellen gehören die genannten Rezeptoren zur Gruppe der Lamellenkörper und befinden sich in der Dermis, Subcutis, sowie in Gelenkkapseln.

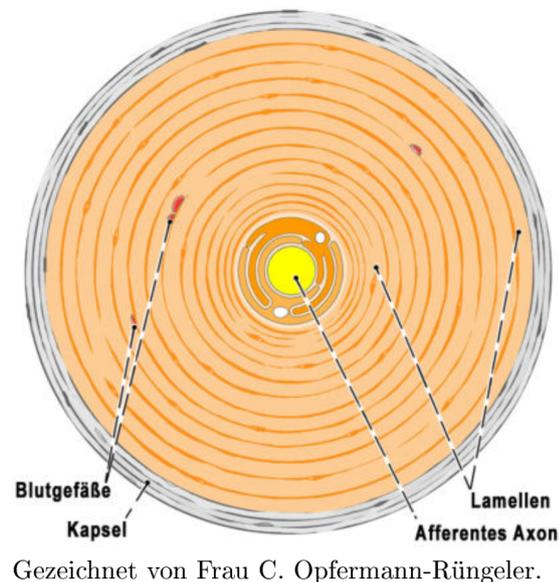
Die größten Lamellenkörper sind die Vater-Pacini-Körperchen, die eine hochdifferenzierte perineurale Kapsel aufweisen und bis zu einer Größe von 3 mm im menschlichen Körper vorkommen können [184, 235, 351, 362]. Eine Nervenendigung befindet sich zwischen dicht aneinanderliegenden zytoplasmatischen Lamellen, die sich am Rand zu einer äußeren Kapsel konzentrieren und in ihrer Gesamtheit eine Art Kolben bilden (s. Abb. 1.8). Besteht ein Lamellenkörper aus mehreren Kolben, wird er als Golgi-Mazzoni-Körperchen bezeichnet. Zwischen den Lamellen sind Kollagenfibrillen, Proteoglykane, kleine Blutgefäße und Makrophagen angeordnet (s. Abb. 1.9). Im Inneren besteht ein VPK aus einem Kern von Schwannschen Zellen, die mit einem myelinisierten Axon eines sensorischen Neurons verbunden sind [25, 156, 184, 348, 374]. Die VPK können aufgrund ihrer großen rezeptiven Fläche Geschwindigkeitsänderungen eines mechanischen Reizes wahrnehmen. In der tiefen Dermis und Subcutis [275] reagieren sie rasch auf Druck- und Vibrationsreize und gehören damit zu *RA-Rezeptoren*<sup>2</sup>. Durch die schnelle Adaption dieser Rezeptoren erkennen sie primär den Geschwindigkeitswechsel eines Reizes (Beschleunigung).

Im Bewegungsapparat sind die VPK unter anderem an der Kraftregulation beteiligt [362]. Die Wahrnehmungsschwelle der VPK liegt bei 100-400 Hz [25, 30, 156, 251, 257, 290, 293]. Nach dem mechanischen Modell von Quindlen et al. hängt der Bereich der Frequenzempfindlichkeit von der Größe des VPKs ab. Demzufolge bilden sich spezifische Cluster von VPKs verschiedener Größe an unterschiedlichen Regionen im menschlichen Körper [276]. Eine hohe Dichte an VPKs (ca. 300) befindet sich im subcutanen Gewebe der palmaren Hand [322]. Ihre Verteilung ist dabei nicht einfach entlang der palmaren Nerven, sondern zeigt spezifische Formationen. In der Literatur wird die Anordnung der VPK der Handfläche entlang kleiner perforierender Hautarterien bspw. als baum- oder straußartig skizziert [168]. Die Lage der VPK in der Fußsohle ist hingegen anders, wodurch die Annahme besteht, dass die Verteilung abhängig ist von den unterschiedlichen funktionellen Anforderungen der Körperregion [152].

Weiter wird in der Literatur ein divergenter Aufbau des inneren Kerns der VPK je nach Lokalisation diskutiert. So sind VPK im Pancreas mit mehreren Axonen im Kern beschrieben worden, die im Gegensatz zu denen mit nur einem Axon ein anderes Bild bei der immunhistologischen Färbung zeigen. Aufgrund dessen wird von verschiedenen Funktionsweisen, vermittelt über jeweils andere Innervation, im VPK ausgegangen (mechanisch und nicht-mechanisch) [106]. Eine weitere noch vage These beschreibt das VPK nicht nur als rein wahrnehmendes Organ, sondern spricht diesem eine auf das umliegende Gewebe einwirkende Funktion zu. Dies beruht auf der Tatsache, dass an den VPK Wachstumsfaktor-Rezeptorproteine nachgewiesen werden konnten [320]. Metabolisierende Enzyme im inneren und äußeren Teil des Kerns lassen die Vermutung

---

<sup>2</sup>RA-Rezeptoren= rapidly adapting receptors; schnell adaptierende Mechanorezeptoren.

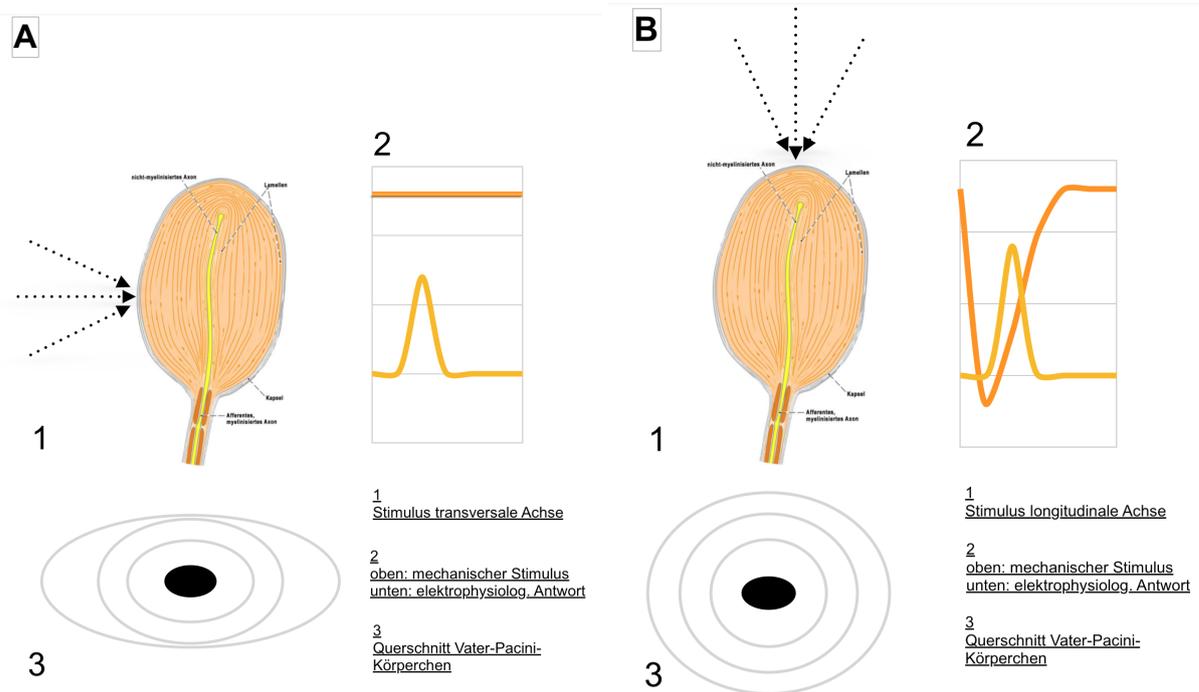


**Abbildung 1.9:** Schematische Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchen im Querschnitt mit umgebender Bindegewebskapsel.

eines eigenen unabhängigen Stoffwechsels der VPK zu [320].

Nachgewiesen werden konnten die VPK neben der Haut auch im Mesenterium, im Pancreas, in der Konjunctiva, innerhalb der Harnblase, der Vagina, am Periost, in Lymphknoten, im Thymus, zwischen Muskelbündeln sowie an Gefäßen (s. Kap. 1.2.4) [26, 97, 246, 251, 254, 345, 362]. Weitere spezifischere Untersuchungen über die Existenz von VPK in unterschiedlichen Regionen des Bewegungsapparates behandeln beispielsweise die Kreuzbänder [48, 165], die Menisken, das Acetabulum [170], das Kiefergelenk [9], Ligamente des Sprunggelenkes [368], die Schulterkapsel [128] und die Gelenkkapsel des Metatarsophalangealgelenkes [311]. In der aktuellen Literatur wird zudem das Vorkommen von VPK bei Pathologien, wie dem Prostata- oder Pancreascarcinom, erwähnt, ohne bisher eine klare Rolle dieser definieren zu können [79, 320].

Eine VPK-Hyperplasie ist bei anderen Krankheitsbildern wie dem Raynaudsyndrom, der Palmar- und Plantarfibromatose, der Dupuytren-Kontraktur, bei Glomustumoren, bei Neurofibromen oder anderer schmerzhafter subcutaner Knötchen berichtet worden [89, 105, 120, 151, 191, 246, 268, 324]. Interessanterweise werden Vater-Pacini-Körperchen ebenfalls mit Entwicklungsstörungen, wie der cervicalen Meningozele (Form der Spina bifida) und cervicalen Raumforderungen aus gutartigem knorpeligem Gewebe in Zusammenhang gebracht [98, 110].



**Abbildung 1.10:** Reizschwelle und Reizantwort eines Vater-Pacini-Körperchens. A: Reiz trifft auf die Querachse, B: Reiz trifft auf die Längsachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach *Il'inskii et al.* [144]).

#### 1.2.4 Propriozeption an Gefäßen

Vater-Pacini-Körperchen konnten in der Adventitia großer Blutgefäße nachgewiesen werden [235, 251, 370]. Das Vorkommen der VPK an großen Gefäßen wird zwar als bekannt angesehen, doch ist die Art ihrer Anordnung, Verteilung und die genaue Funktion dieser an Gefäßen zuweilen nebulös. Eine anatomische Beschreibung der Lage der VPK in Beziehung zu den Gefäßen wird als Schlüssel für ihre Funktion im vaskulären System gesehen. Bereits 1954 zeigte eine anatomische Untersuchung an Embryonen VPK im Bereich der Aorta abdominalis, thoracalis und um die Vena cava inferior [291]. Auch die Adventitia der Arterien der oberen und unteren Extremität (Aa. brachialis, radialis, ulnaris, femoralis, poplitea, tibialis) wird von VPK durchzogen. Dabei befinden sich die Mechanorezeptoren im Bindegewebe neben den tiefen Gefäßen oder innerhalb der Bindegewebsscheide, die die Vene und Arterie umschließt [24, 257, 285, 363, 367].

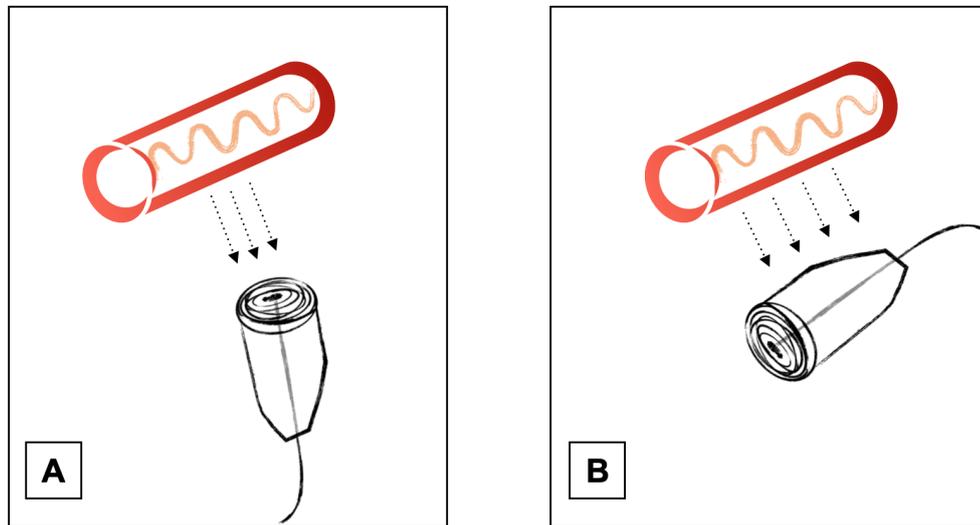
In der Literatur ist weiter bekannt, dass VPK als schnell adaptierende Mechanorezeptoren (Vibrationsdetektoren) in der Nähe größerer Blutgefäße auf Änderungen der Herzfrequenz rea-

gieren [257]. Im Mesenterium bspw. werden durch Änderungen des Perfusionsdruckes der *A. mesenterica superior* die VPK stimuliert. Hingegen erfolgt keine Reaktion der VPK bei Änderung der Temperatur oder der Oxygenierung des Blutes. Über diese Propriosensorik wird vor allem der Grad der Dehnung der Mesenterialgefäße detektiert [104]. Untersuchungen an der Mesenterialarterie bei Katzen zeigten Impulse der VPK auf die arterielle Pulsation in jedoch unterschiedlicher Weise. So konnte bei Blutdruckerhöhung einerseits eine Steigerung der Impulsfrequenz und andererseits eine Unterdrückung der VPK-Impulse nachgewiesen werden [104, 370]. Am Oberarm untersuchten Onishi et al. den Zusammenhang zwischen Pulsation und Gefäßgeräuschen und zeigten, dass die durch Kompression der Brachialarterie erzeugten Gefäßgeräusche mit der pulsierenden Empfindung des Probanden einhergingen. Als relevanten Mechanorezeptor beschreiben die Autoren dabei die VPK an den tiefen Blutgefäßen der oberen Extremität [251].

Allgemein ist in der Literatur der Zusammenhang zwischen VPK-Aktivierung und Blutgefäßen wie folgt beschrieben: Trifft ein Stimulus vertikal (*longitudinal*) auf das Vater-Pacini-Körperchen, so besteht eine deutlich erhöhte Reizschwelle für eine elektrophysiologische Antwort (s. Abb. 1.10). Wird ein mechanischer Reiz hingegen auf die Querachse des VPK angelegt (*transversal*) so ist die Reizschwelle herabgesetzt [144]. Für die Detektion von Änderungen der Pulsrate in Blutgefäßen wird aufgrund dessen in der Literatur [251] ein paralleler Verlauf der VPK zu den Blutgefäßen als effektiv postuliert (siehe B in Abb. 1.11). Eine andere Theorie betitelt das Vater-Pacini-Körperchen an Gefäßen als Manometer. Grundlage dessen ist die Gegebenheit, dass das Körperchen über eigene Kapillaren verfügt und über diese Veränderungen im Blutkreislauf registriert und angepasst werden [252, 342]. Ein komplexer Reflexbogen zwischen Gefäßfülle, Blutdruck und Vater-Pacini-Stimulation wird ohne abschließende Meinung diskutiert [370].

Ein einheitliches Bild herrscht hingegen in Bezug auf die ähnliche Morphologie und den Aufbau der VPK, die sich nicht von denen der cutanen VPK unterscheiden. So zeigen Vater-Pacini-Körperchen an der großlumigen Femoralarterie oder an Lymphknoten nicht nur die bekannte allgemeingültige Gestalt, sondern auch ein ähnliches immunhistologisches Färbemuster wie die VPK der Hand [97, 235]. Unabhängig von ihrer Lage wird dementsprechend von derselben Funktionsweise der VPK im gesamten Körper ausgegangen [257].

Zusammenfassend wird eine enge Verbindung zwischen Vater-Pacini-Körperchen und dem Gefäßsystem vermutet [104]. Die genaue Rolle und Verteilung der Mechanorezeptoren an Gefäßen bleibt aktuell jedoch unklar und ist spekulativ [106, 235, 251]. Untersuchungen zu Vater-Pacini-Körperchen an einer *A. nutricia* sind in der aktuellen Literatur (Stand August 2023) nicht zu finden.



**Abbildung 1.11:** Stimulation zwischen Gefäß und Vater-Pacini-Körperchen; A: Reiz trifft auf Längsachse, B: Reiz trifft auf Querachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach *Il'inskii et al.* [144]).

### 1.3 Klinische Relevanz des Os metatarsale I

Bereits 1978 schätzten Mann et al., dass 90 % aller Fußprobleme im Bereich des Vorfußes auftreten und dabei die Region des Os metatarsale I am relevantesten sei. Erkrankungen, die auf strukturellen Veränderungen des Fußes beruhen, betreffen ca. 60 % der erwachsenen Bevölkerung [86, 123]. Schuhbedingte Beschwerden und ihre Auswirkungen stellen zudem ein ökonomisches Problem im Gesundheitswesen dar und verursachen schätzungsweise jährlich 3 Billionen US-Dollar an Behandlungskosten in den USA [75, 334]. Waizy et al. betonen in diesem Zusammenhang, dass für das Verständnis der Hallux-valgus-Fehlstellung und die gezielte Therapie die Kenntnis der anatomischen und pathoanatomischen Zusammenhänge unabdingbar ist [356].

#### 1.3.1 Krankheitsbild des Hallux valgus

Der Hallux valgus ist die häufigste Pathologie des Vorfußes beim Erwachsenen [213, 355, 356, 376] und wurde bereits 1870 von Karl Hueter in der Literatur erwähnt [87, 140, 163, 264, 339, 356]. Dass diese Fehlstellung jedoch bereits früher auftrat, lässt das Gemälde „*Krönung der Jungfrau*

*Maria*“ (1502) von Raphael vermuten, in dem der heilige Johannes mit einem Hallux valgus am rechten Fuß dargestellt wird [303]. Heute gehört die Pathologie zu den am häufigsten behandelten Erkrankungen in der Fußchirurgie [138, 327] und stellt damit einen Hauptverursacher der Kosten in diesem fachspezifischen Bereich dar [250].

Erwachsene sind deutlich häufiger von dieser Pathologie betroffen als Kinder [132, 270]. Der HV bei Kindern und Jugendlichen stellt eine eigenständige Gruppe dar, die unter dem Begriff „juvener Hallux valgus“ zusammengefasst wird [63, 132, 250]. Eine britische Studie zeigte eine Prävalenz des Hallux valgus von 28,4 % in der erwachsenen Bevölkerung [287]. Eine allgemein gültige und tatsächliche Prävalenz ist schwierig anzugeben, da die Definition des HV in den zahlreichen Studien stark variiert [222, 250, 376]. In ihrem Review zeigten Nix et al. eine gepoolte Prävalenz von 23 % bei Erwachsenen zwischen 18 und 65 Jahren und von 35,7 % bei Menschen über 65 Jahren. Am häufigsten tritt ein HV, bei einem mittleren Erkrankungsalter von 31 Jahren, nach dem 60. Lebensjahr auf [65, 271]. Insgesamt nimmt die Prävalenz des HV mit dem Alter zu [51, 250, 287]. Die Pathologie tritt fast ausschließlich in Gesellschaften auf, in denen Schuhe getragen werden [21, 62, 303, 306]. Darüber hinaus ist das weibliche Geschlecht sehr viel häufiger betroffen, als das Männliche [32, 51, 65, 101, 123, 132, 213, 249, 250, 271, 356].

Die Pathogenese sowie die Ätiologie wird bei Männern und Frauen unterschiedlich angenommen [249]. Auch herrscht Diskrepanz in Bezug auf den Schweregrad der Deformität: so sind Frauen häufiger von schweren und mittelgradigen Formen betroffen [51]. Das Auftreten von Schmerzen ist bei Frauen zudem etwas häufiger als bei Männern und diese nehmen häufiger (im Verhältnis 1:15) eine operative Therapie in Anspruch [132, 249, 264]. In 84 % der Fälle tritt zudem ein bilateraler HV auf [356].

Objektiv wird von einem Hallux valgus bei einer Winkelabweichung der Großzehe, in Bezug auf ersten Metatarsalknochen, von über 15° gesprochen [85, 111, 125, 249, 270]. Generell handelt sich bei dem Hallux valgus um eine sehr komplexe Deformität, welche bis heute noch nicht allumfassend verstanden wird [87, 123, 264, 323, 355, 376]. Dabei tragen, laut Schneider et al., die degenerativen Veränderungen der Weichteile des ersten Strahls zur Pathologie des HV den größten Teil bei. Das klinische Vollbild der Deformität wird nach mehreren Entwicklungsschritten erreicht, die unaufhaltsam fortschreiten [132, 264, 356]. Die Pathogenese beginnt mit einer Abweichung der Großzehe nach lateral sowie des ersten Metatarsalknochens nach medial [28, 101, 116, 121, 123, 125, 213, 296]. Die proximale Phalanx verschiebt sich in Valgusstellung. Der erste Mittelfußknochen und der Sesambeinkomplex stehen nicht mehr kongruent zueinander [296, 355]. Der angrenzende Schleimbeutel entzündet sich im Verlauf und trägt zum Bild des HV bei [101, 264, 323]. Die Lateralisierung von Extensor- und Flexorsehne der Großzehe hat zusätzlich einen negativen Einfluss auf die Deformität [87, 132, 138]. Auch die Sehne des M. abductor hallucis zeigt beim HV eine pathologische Position. Die Plantarisierung dieser Sehne steht

im Zusammenhang mit dem Schweregrad des Hallux valgus [94, 355]. In einem späteren Stadium wird von einer weiter fortschreitenden Subluxation des ersten Metatarsophalangealgelenks gesprochen [68, 113, 213, 270, 271, 296].

Eine anatomische Untersuchung zeigte, dass Unterschiede in der Zusammensetzung der Kollagenfibrillen zwischen Füßen mit und ohne HV bestehen. Die Autoren schließen daraus, dass die pathologische mechanische Beanspruchung beim HV zu einer veränderten Organisation der Kollagenfibrillen führt [343]. Infolgedessen resultiert insgesamt eine Insuffizienz des ersten Strahls [286]. Weiter wird weniger über die Großzehe beim Gehen abgerollt und das Körpergewicht verlagert sich vom Os metatarsale I zusätzlich auf die Ossa metatarsalia II-IV (sog. „*Transfermetatarsalgie*“). Diese resultierende Fehlbelastung kann zur Ausbildung von Clavi an den Weichteilen der Ossa metatarsalia I-IV führen [328]. Coughlin et al. zeigten in einer Follow-up-Studie mit 159 Patienten, dass das Ausmaß der Deformität nicht in Zusammenhang mit dem zeitlichen Beginn der Pathologie gebracht werden kann. Auch besteht keine Beziehung zwischen der Schwere des HV und den angegebenen Schmerzen [51, 65]. Symptome allgemein sind Schmerzen im Bereich des medialen Ballens, des ersten MTP-Gelenkes, des plantaren Fußes sowie Schmerzen bei Belastung [40, 65, 96, 111, 132, 201, 250]. Mit zunehmender Deformität kommt es zu Problemen beim Tragen von nicht angepasstem Schuhwerk [113, 132]. Zugleich existiert ebenfalls ein beschwerdefreies Patientengut [51, 87].

Ursachen und Einflussfaktoren der Pathologie des Hallux valgus wurden vielfältig untersucht:

- genetische Prädisposition [65, 87, 123, 125, 132, 249, 271, 303, 356]
- einengendes Schuhwerk [55, 64, 65, 67, 85, 132, 164, 173, 223, 249, 356]
- Beruf [65, 101]
- Pathologie des Plattfußes [65, 161, 213, 249]
- Pronation des Rückfußes [93]
- Hypermobilität des Tarsometatarsalgelenkes [65, 95, 115, 119, 154, 172, 187, 242, 302]
- Kontraktur der Achillessehne [65, 213, 264, 376]
- Länge des ersten Metatarsalknochens [65, 211, 238, 264, 328]
- neuromuskuläre Erkrankungen [264, 328]
- BMI [103, 249]

Betrachtet auf den einzelnen Patienten, lässt sich festhalten, dass mehrere dieser Faktoren (intrinsisch und extrinsisch) und ihr Zusammenspiel zum Hallux valgus führen können [264, 376]. Bei der Diagnosestellung ist im Rahmen der Anamnese ein besonderes Augenmerk auf die Familiengeschichte zu legen [132]. Nach der klinischen Untersuchung und Beurteilung des Ganges des Patienten wird eine Röntgenaufnahme (anterior-posterior & lateral) des Fußes im Stehen erstellt [2, 87, 101, 286, 328, 356, 376]. Dabei sind im Röntgenbild mehrere zu messende Winkel zu nennen: der Hallux-Valgus-Winkel (HVA), der Intermetatarsal-Winkel (IMA), Hallux-Valgus-Interphalangeus-Winkel (HVI) und der distale Mittelfußgelenk-Winkel (DMAA) [87, 101]. Gleichzeitig gilt es die mögliche Subluxation sowie Degeneration des MTP-Gelenkes und die Sesambein-Position zu beurteilen [68].

Der Schweregrad des HV wird bestimmt durch die klinische Symptomatik sowie dem radiologischen Befund. Dabei kann zwischen einer „milden“, „mittelgradigen“ und „schweren“ Form unterschieden werden [18, 68, 107, 132, 356].

#### 1.3.2 Klassische offene Operationsmethoden

In den meisten Fällen beginnt die Behandlung des HV mit einer konservativen Therapie [132, 343]. Dabei steht die Schmerzlinderung und die Reduktion von Einschränkungen im Alltag im Vordergrund. Besondere Personengruppen stellen hierbei Kinder, Jugendliche und komorbide Patienten (u. a. mit peripherer arterieller Verschlusskrankheit, Diabetes mellitus, Raucher) dar [101, 132, 180, 286, 356, 376]. Die konservative Therapie beinhaltet z. B. das Vermeiden von zu engem und hohem Schuhwerk. Empfohlen wird ein weiches Schuhwerk mit breitem Zehenbett unterstützt durch individuell angepasste Einlagen [87, 286, 356, 376]. Physikalische Therapie ist ebenfalls ein Bestandteil des konservativen Therapieregimes. Es fehlen wissenschaftliche Belege, dass nicht-operative Maßnahmen die Deformität korrigieren können [87, 101, 132, 327, 328, 356]. Demnach zeigte eine *Follow-up*-Studie keinen signifikanten Einfluss angepasster Orthesen auf das Fortschreiten der Deformität nach 12 Monaten [278]. Weiter zeigten Torkki et al. in einer Studie, dass das Tragen von Einlagen nur eine kurzfristige Linderung von Symptomen bringt [99, 327, 338]. Auch die Strategie des „*watchful-waitings*“ kann beim HV vernachlässigt werden, denn die natürliche Entwicklung dieser Pathologie zeigt im Verlauf keine spontane Verbesserung [87, 99]. Bei weiter bestehenden Schmerzen und einer fortschreitenden Deformität ist eine Operation oftmals unumgänglich. Des Weiteren spielen der Patientenwunsch und die Einschränkungen im Beruf und Alltag eine Rolle bei der Indikationsstellung [121, 132, 286, 376].

Das Operationsprinzip der Hallux-valgus-Korrektur ist zum einen die Wiederherstellung des funktionellen Gleichgewichts zwischen abduktorisches und adduktorisches wirkenden Muskelgruppen, sowie eine Zentrierung des Metatarsalköpfchens über die Sesambeine [92, 113, 296]. Dazu folgt eine knöchernen Korrektur verknüpft mit einer Wiederherstellung der Weichteilbalance

**Tabelle 1.1:** Übersicht Operationen

<b>Gruppe</b>	<b>Bezeichnung</b>
proximale phalangeale Osteotomien	Akin, Keller
distale metatarsale Osteotomien	Chevron/Austin, Mitchell, Wilson, Kramer
metatarsale Schaftosteotomie	Scarf, Ludloff
Basisosteotomien	Open-/Closing-Wedge
proximale Arthrodesen	Lapidus

*nach Robinson et al. [286]*

[18, 188, 355, 356]. Es wurden bis heute mehr als 100 verschiedene Operationsmethoden für den Hallux-valgus in der Literatur beschrieben [8, 40, 68, 88, 132, 286, 339, 376]. Dabei wird allgemein in gelenkerhaltende und gelenkresizierende Operationen unterteilt [376]. Die offenen Verfahren gelten in der Hallux-valgus-Chirurgie als Goldstandard [371]. Im Bereich der gelenkerhaltenden Operationen ist jeweils die Position der Osteotomie, die Art der Fixierung oder die Durchführung einer Arthrodesen entscheidend [111]. Die sich hieraus ergebenden Gruppen sind in Tab. 1.1 genannt. Im Folgenden soll die Chevron-Osteotomie, zugehörig zu den distalen metatarsalen Osteotomien, hauptsächlich diskutiert werden. Die Auswahl der operativen Therapie ist abhängig von mehreren Faktoren und den gemessenen Winkeln [101]:

- Schweregrad der Deformität
- Zustand des Metatarsophalangealgelenks
- Größe und Form des Mittelfußknochens
- Abweichung der distalen Phalanx

Es besteht ein klar definierter und übersichtlicher Therapiealgorithmus. So schlagen Autoren bspw. bei einem kongruenten Metatarsophalangealgelenk, einem HVA kleiner  $30^\circ$  und einem IMA zwischen  $10^\circ$ - $15^\circ$  eine Chevron-Osteotomie vor [328]. Ist der Intermetatarsal-Winkel größer  $15^\circ$ , bei gleichzeitig bestehenden HVA größer  $45^\circ$ , so ist eine Scarf-Osteotomie indiziert [101, 286]. Einfach zusammengefasst, lassen sich leichte bis mittelschwere Formen mit einem distalen Verfahren (z. B. Chevron-Osteotomie) korrigieren, während bei schweren Formen eine proximale (basale) metatarsale Osteotomie oder eine Lapidus-Arthrodesen zu bevorzugen ist [18, 68, 88, 186, 339]. Je proximaler die Osteotomie, desto größer ist dabei das Korrekturpotential [376]. Ungeachtet dieser Algorithmen und Richtlinien sollte jedes Behandlungsprinzip individuell an den Patienten angepasst werden [87, 327]. Trotz der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Techniken, und der Beurteilung dieser durch viele Studien, lässt sich keine Methode finden, die anderen deutlich

überlegen ist [99, 111, 132, 286, 339].

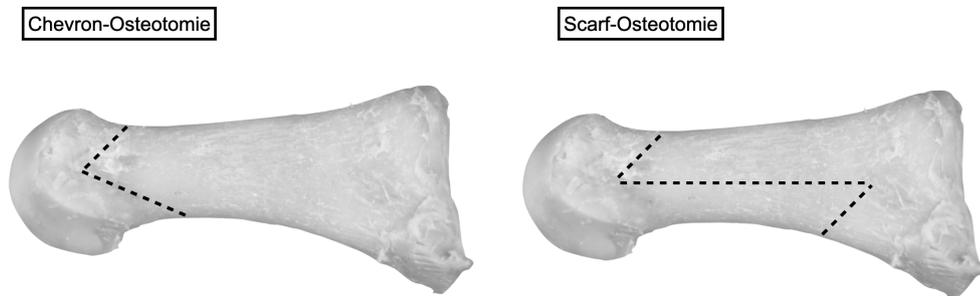
### 1.3.3 Chevron-/Austin-Osteotomie

Die Chevron-Osteotomie ist eine der anerkanntesten und am häufigsten angewendeten Methoden zur Korrektur eines milden bis moderaten HV [18, 40, 111, 158, 180, 186, 201, 248, 266]. Diese Operation ist ursprünglich von Corless [60], Austin und Leventen [14] sowie Johnson et al. [155] beschrieben worden [88]. Die etablierten und die modifizierten Verfahren der Chevron-Osteotomie zeigen postoperativ gute klinische und radiologische Ergebnisse [40, 61, 88, 155, 188, 340]. Durch die Art der Osteotomie besteht eine hohe Primärstabilität [68, 328, 349] und ermöglicht eine schnelle Heilung des Knochens [186, 299]. Des Weiteren ist direkt im Anschluss an eine Chevron-Osteotomie eine Vollbelastung erlaubt, sodass auch bilaterale Eingriffe möglich sind [52].

Nach einer medialen Hautinzision folgt ein Einscheiden der Kapsel, z. B. in T- oder L-Form [2, 52, 186, 299]. Es folgt das „*laterale release*“ (LatR.) (siehe Kap. 1.3.4) und das Abtragen der medialen Exostose. Im Anschluss wird eine v-förmige Osteotomie proximal zum Caput des Metatarsalknochens gesetzt [376]. Der Winkel der Osteotomie kann dabei je nach Modifikation variieren. Der ursprünglich beschriebene Winkel beträgt  $60^\circ$  zwischen den Osteotomieschenkeln [2, 52, 158, 186, 299, 328]. Die Spitze der Osteotomie befindet sich in der Mitte des Metatarsalköpfchens (s. Abb. 1.12) [68, 158]. Das somit entstandene Fragment wird nach lateral verschoben [52, 286]. Dabei kann das Fragment bei Männern bis zu 6 mm und bei Frauen bis zu 5 mm sicher deplatziert werden. Es besteht hierbei trotzdem eine Knochenkontaktfläche von über 50 % [16]. Anschließend kann dieses Caputfragment mit einer Schraube, einem Kirschnerdraht oder auch mit einer bioresorbierbaren Fixierung adaptiert werden [52, 70, 114, 214, 340]. Distale Osteotomien werden in den meisten Fällen mit einem Weichteilverfahren und einer Kapsulotomie kombiniert [201], um das Korrekturpotential zu steigern [52, 186]. In diesem Zusammenhang wird oftmals die phalangeale Akin-Osteotomie ebenfalls mit der Chevron-Osteotomie angewendet [52, 230]. Bei den modifizierten Verfahren kann der Osteotomiewinkel verändert, ein LatR. oder die Durchtrennung der Adduktorsehne hinzugefügt werden [180]. Trotz der möglichen Modifikationen ist der Einsatz der Chevron-Osteotomie begrenzt, sodass bei ausgesprägten Deformitäten andere Osteotomien eingesetzt werden müssen [52].

### 1.3.4 Weichteiltechniken

Unter diesem Begriff werden operative Vorgehensweisen zusammengefasst, die das Ungleichgewicht der Weichteilstrukturen und die Ausrichtung des MTP-Gelenkes vor der eigentlichen

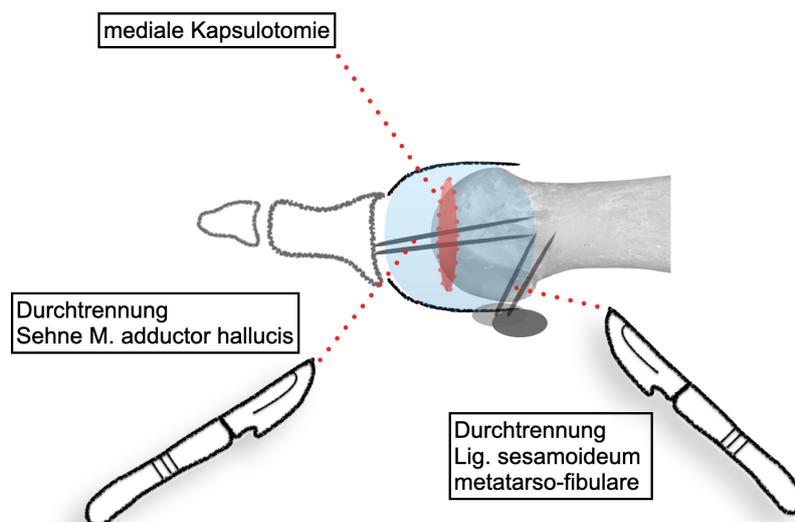


**Abbildung 1.12:** Schnittführung der Osteotomie bei Chevron- und Scarf-Osteotomie am Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach *Engelhardt et al.* [92]).

Osteotomie korrigieren sollen [2, 295, 296, 307, 376]. Diese sind oft notwendig, um eine ausreichende Korrektur zu erhalten und ein Rezidiv des Hallux valgus zu vermeiden [18, 138, 158, 163, 180, 186, 265, 266, 272, 296, 299]. Verfahren mit einer Weichteiltechnik zeigen allgemein bessere klinische Ergebnisse und eine höhere Patientenzufriedenheit als Verfahren ohne Weichteiltechniken [12, 121, 255, 296]. Sie sind damit fester Bestandteil der operativen Korrektur des Hallux valgus [307, 319]. Die lateralen Strukturen sind bei der Pathologie des HV oftmals kontrahiert und müssen gelöst werden. Im Gegensatz dazu sind die medialen Weichteile eher verschlissen und benötigen eine Straffung [296]. Zu nennen sind hierzu laterale, mediale und minimalinvasive Weichteiltechniken [307, 355]. Das „laterale release“ (siehe Abb. 1.13) betrifft folgende anatomische Strukturen [2, 121, 186, 295, 299, 307, 319, 357]:

- Os sesamoideum laterale
- laterale Gelenkkapsel
- Sehne des M. adductor hallucis
- Ligamentum metatarsale transversum profundum
- Ligamentum metatarsale sesamoideum laterale (fibulare)

Die Relevanz jeder einzelnen Struktur und ihr Potenzial zur Korrektur ist umstritten [295]. Der Zugang zu jenen Strukturen erfolgt dabei unterschiedlich. Je nach Technik kann dieser von medial transartikulär, von dorsomedial extraartikulär oder durch eine zusätzliche Inzision von dorsal oder plantar erfolgen [2, 52, 193, 255, 296, 307, 355]. Für den dorsalen Zugangsweg wird interdigital zwischen Metatarsus I und II ein 1-1,5 cm langer Hautschnitt gesetzt [2, 328]. Die Gelenkkapsel kann darauffolgend linear horizontal eingeschnitten werden [266]. Das Lig. metatarsale profundum wird durchtrennt und die laterale Gelenkkapsel sparsam eingeschnitten [212]. Thomas et al. [332] trennen zudem über eine laterale Sesamoidektomie den lateralen Anteil des Musculus flexor hallucis brevis vom ersten Strahl ab. Der effektivste Bestandteil im Weichteilverfahren stellt das Ablösen des Lig. sesamoideum metatarso-fibulare dar [295, 296]. Medialseitig erfolgt eine Naht des Lig. metatarso-sesamoideale mediale zur Reposition des Metatarsalköpfchens auf die Sesambeine [296]. Von einem Ablösen des plantaren Anteils der Gelenkkapsel wird explizit abgeraten, um die Blutversorgung des ersten Metatarsalköpfchens nicht zu gefährden [158, 296].



**Abbildung 1.13:** Operationsschritte des lateralen Release mit medialem Zugangsweg (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach Engelhardt et al. [92]).

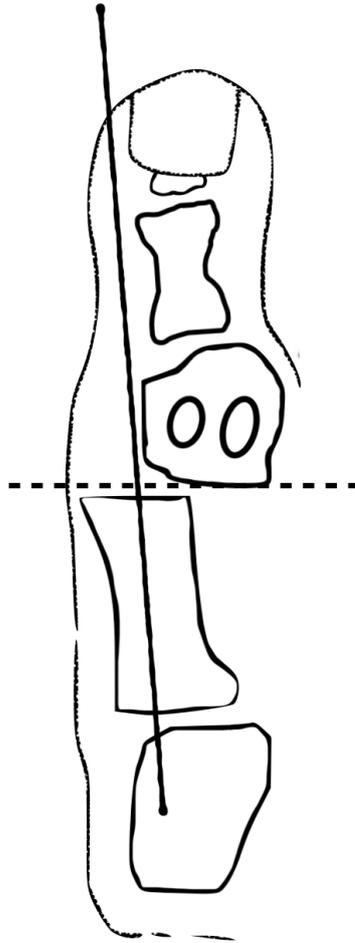
Die Chevron-Osteotomie kann mit dem LatR. und mit der Abtrennung der Adduktorsehne kombiniert werden [280]. Ziel ist es, das Metatarsalköpfchen auf die Sesambeine zu repositionieren [296]. Die postoperative Ausrichtung der Großzehe und das funktionelle Ergebnis der kombinierten Operation können besser sein, als eine Chevron-Osteotomie ohne LatR. [88]. Überraschenderweise ist die Patientenzufriedenheit insgesamt ähnlich, unabhängig, ob die Chevron-Osteotomie mit oder ohne LatR. kombiniert wurde [88]. Auch bezüglich der Abtrennung der Adduktorsehne herrscht ein ähnliches Bild. Das klinische und radiologische Erscheinungsbild war mit Adduktorsehnedurchtrennung zwar signifikant besser, doch nicht die Patientenzufriedenheit [280]. Die Korrektur der Weichteile ist ein wesentlicher und unverzichtbarer Bestandteil in der Hallux-valgus-Chirurgie, um den physiologischen Zustand des ersten Strahls wiederherzustellen [296]. Die meisten Verfahren werden mit einem Weichteileingriff kombiniert. Einige Operateure verzichten jedoch auf diese.

### 1.3.5 Minimalinvasive Verfahren

Die Therapie des HV hat sich in den letzten Jahrzehnten stark gewandelt [81, 96, 160, 163, 218, 327, 371]. Neben den erwähnten klassischen Operationsmethoden wurden im letzten Jahrzehnt minimalinvasive, perkutane Operationen entwickelt, die immer mehr Anwendung im klinischen Alltag finden. Diese Techniken werden in der Literatur unterschiedlich bezeichnet. „Minimalinvasive“, „perkutane“ Verfahren oder „Mikrochirurgie“ werden als Begriffe für diese neue Gruppe der Operationen verwendet und sind nicht als Synonyme zu verstehen [28]. Ähnlich wie bei minimalinvasiven Eingriffen an anderen Körperregionen werden hierbei eine verkürzte Heilungsdauer, weniger traumatische Schäden, bessere Kosmese, kürzere Operationszeit sowie eine geringere Komplikationsrate angenommen [8, 28, 40, 101, 111, 188, 339]. Anwendung finden diese Verfahren beim milden und mittelgradigen Hallux valgus [113, 142, 160, 201]. Auch in diesem Bereich ist die Auswahl an Techniken sehr groß und es ist komplex eine einheitliche und anschauliche Beschreibung über diese Gruppe der Operationen zu geben. Mittlerweile existieren Verfahren der dritten Generation [188].

Allgemein beruhen die minimalinvasiven Techniken auch regelhaft auf der Kombination aus knöchernem und weichteiligem Eingriff. Die meisten umfassen eine distale Osteotomie mit perkutaner, lateraler Freisetzung von Strukturen des Weichteilmantels und eine proximale Phalanxosteotomie [28]. Andere Autoren verzichten auch hier auf einen parallel durchgeführten Weichteileingriff [33, 96, 201]. Es werden kleinste Inzisionen verwendet [96, 227, 355], wodurch die Weichteilmanipulation sehr gering gehalten werden kann [8, 82]. Eine ursprünglich von Bösch [33] beschriebene Operation beginnt mit dem Einbringen eines K-Drahtes durch die medialen Weichteile der distalen Phalanx, der dann paraossär in Richtung Metatarsalköpfchen verläuft (s. Abb. 1.14). Mit einer 1 cm langen Hautinzision wird der Metatarsalknochen für eine ge-

rade Osteotomie zugänglich [376]. Das Metatarsalköpfchen wird nach lateral verschoben und der K-Draht wird, am Köpfchen vorbei, durch den Schaft des Metatarsalknochens in dessen Basis eingebracht. Dieser verbleibt 5-6 Wochen postoperativ [376]. Bei anderen minimalinvasiven Techniken wird auf eine derartige interne Stabilisation verzichtet und postoperativ rein mit Tape-Verbänden gearbeitet [96, 330].



**Abbildung 1.14:** Schematische Darstellung des minimalinvasiven Verfahrens nach *Bösch* am Os metatarsale I. Nach der subcapitalen Osteotomie (gestrichelte Linie) wird das Fragment mit einem Kirschnerdraht in Position gehalten (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach *Bösch* [33]).

Die *SERI*<sup>3</sup> stellt ein weiteres minimalinvasives Verfahren dar [113]. Die von Giannini 1998 beschriebene Technik vereint Komponenten mehrerer etablierter Operationen. Dieses Verfahren umfasst nach einem 1 cm langen medialen Schnitt eine vertikale Osteotomie proximal des Caputs vom ersten Metatarsalknochen [111]. Sie wurde bereits von Hohmann, Wilson und Margel angewendet [136, 205, 365]. Ähnlich wie bei dem Verfahren nach Bösch wird auch hier ein Kirschnerdraht zur Fixation verwendet [33].

Die Weiterentwicklung der traditionellen Chevron-Osteotomie im Rahmen der Mikrochirurgie trieben auch Vernois et al. voran [163]. Beim perkutanen Verfahren wird neben den kurzen Stichinzisionen die Osteotomie weiter proximal außerhalb der Gelenkkapsel gesetzt [163]. In einer anatomischen Untersuchung bestätigten die Autoren die Unversehrtheit der Kapsel, des Sesamoidkomplexes sowie der Sehnen des M. flexor hallucis longus, M. extensor hallucis longus sowie des M. abductor hallucis [218]. Diese minimalinvasive Chevron-Osteotomie (PECA)<sup>4</sup> zeigte vergleichbare gute klinische und radiologische Ergebnisse wie das traditionelle Verfahren [188, 218]. Mögliche größere Komplikationen (einschließlich der avaskulären Nekrose) sind bei diesem Verfahren kaum nachzuweisen [188, 198].

Eine Vielzahl an Studien belegt gute Ergebnisse der minimalinvasiven Verfahren insgesamt [1, 40, 96, 201, 209, 218, 339]. Trotz dieser schlussfolgern Autoren, dass es noch Langzeitstudien benötigt, um eine generelle Empfehlung für MIS gegenüber den traditionellen Verfahren zu geben [28, 40, 96, 101, 163, 188, 204, 218, 289, 330, 339, 339]. Darüber hinaus sind minimalinvasive Verfahren nicht geeignet für Anfänger in der Fußchirurgie, sondern verlangen erfahrene Operateure [23, 81, 218, 330]. Des Weiteren sind diese Techniken hauptsächlich zur Behandlung eines milden bis moderaten Hallux valgus geeignet [28, 111, 139, 163, 330].

### 1.3.6 Komplikation avaskuläre Osteonekrose (AVN)

Generelle Komplikationen der distalen Korrekturosteotomien sind Wundheilungsstörungen, Infektionen, die sog. „*non-union*“<sup>5</sup>, mangelhafte Korrektur, Rezidiv des Hallux valgus, Hallux varus, Pseudarthrosenbildung, Bewegungseinschränkungen, Transfermetatarsalgie sowie die avaskuläre Nekrose (AVN) [8, 18, 20, 52, 99, 180, 227, 286, 328].

Die avaskuläre Osteonekrose des Metatarsalköpfchens stellt dabei die schwerwiegendste Komplikation nach distalen metatarsalen Osteotomien dar [18, 81, 96, 111, 286]. Eine avaskuläre Nekrose im Knochen allgemein wird als pathologisches Geschehen beschrieben, bei dem die Knochengefäße so beeinträchtigt werden, dass ein Zelltod von Knochen- und Markzellen resultiert [233]. Dabei stellt der Fuß eine Körperregion dar, an der nicht nur iatrogene, sondern

---

<sup>3</sup>SERI = simple, effective, rapid, inexpensive.

<sup>4</sup>PECA = perkutane intraartikuläre Chevron-Akin Osteotomie.

<sup>5</sup>non-union= ausbleibende Heilung des Knochens nach Operation oder Frakturen.

**Tabelle 1.2:** Komplikationen nach retrokapitalen Korrekturosteotomien

Komplikation	Häufigkeit
Bewegungseinschränkung	12,1 % (1 - 17,6 %)
Arthrosezeichen	12,5 % (4 - 25 %)
Rezidiv Hallux valgus	6,9 % (1,8 - 11,8 %)
Hallux varus	4,8 % (0 - 8,7 %)
Transfermetatarsalgie	3,2 % (0 - 4,5 %)
Pseudarthrose	3,1 % (0 - 6 %)
Knochenzysten MFK I	3,0 % (0 - 6,4 %)
Materialversagen	2,0 % (0 - 4,2 %)
<b>avaskuläre Nekrose MFK I</b>	0,8 % (0 - 1,7 %)

nach Baraliakos et al.

auch idiopathische avaskuläre Nekrosen auftreten können (*Morbus Freiberg/ Köhler II, Morbus Köhler I*<sup>6</sup>) [91, 294]. Doch ist die iatrogene Verletzung durch die Hallux-valgus-Chirurgie die häufigste Ursache der AVN bei Erwachsenen [294, 316]. Im Hinblick auf die iatrogenen und posttraumatischen Schädigungen wird eine Unterbrechung bzw. ein Zerreißen von versorgenden Gefäßen postuliert. Hingegen wird bei den idiopathischen Formen von einer extravasalen intraossären Tamponade (dem Kompartmentsyndrom ähnlich) ausgegangen. Grundlage dessen sind erhöhte intraossäre Druckwerte, die im Knochen nachgewiesen werden konnten und mit einer Dekompression therapiert wurden [80].

Die Inzidenz der AVN in Bezug auf das Os metatarsale I ist in der Literatur sehr divergent beschrieben. So zeigten einige Studien eine Inzidenz von 0 %, andere von 40 % der AVN nach distalen metatarsalen Osteotomien [14, 147, 155, 180, 186, 221, 279, 340, 364]. Stukenborg-Colsman et al. berichteten über eine Häufigkeit von 0,8 % (0-1,7 %) dieser gefürchteten Komplikation. Die AVN wird von vielen Autoren bei der Chevron-Osteotomie als bekannt, aber selten beschrieben [2, 18, 22, 158, 180, 296, 376]. Ähnlich zu der unklaren Epidemiologie und Ätiologie ist auch das klinische Erscheinungsbild der AVN nicht einheitlich [180]. In vielen Fällen präsentiert sich die Osteonekrose asymptomatisch [29, 137, 147, 179, 294]. Andere Patienten zeigen eine leichte Schwellung um das erste Metatarsophalangealgelenk sowie Schmerzen und damit einhergehende Einschränkungen im Bewegungsablauf [313].

Als radiologische Kriterien für die Osteonekrose gelten eine unregelmäßige Ossifikation, Knochenzysten und Gelenkspaltverschmälerung [29]. Spezifisch wurde für die Osteonekrose des Metatarsalköpfchens das „*Sichelzeichen*“, die Fleckung des Köpfchens sowie fokale röntgendurchlässige Bereiche beschrieben [332]. Die Therapie einer AVN richtet sich nach dem Schweregrad und

<sup>6</sup>Morbus Köhler I entspricht der idiopathischen aseptischen Nekrose des Os naviculare. Morbus Köhler II oder Morbus Freiberg betrifft die Köpfchen der Ossa metatarsalia II-IV.

beinhaltet neben konservativen Maßnahmen (Therapie mit NSAR, Kryotherapie, Entlastung mittels Unterarmgehstützen, orthopädisches Schuhwerk, Sportverzicht) ein operatives Debridement, Dekompressionsverfahren bis hin zur Knochentransplantation und Gelenkersatz [294, 313].

Zahlreiche Autoren sehen die Ursache der AVN bei distalen Korrekturosteotomien in dem Operationsschritt des „*lateralen release*“ [2, 68, 129, 148, 180, 221, 247, 279, 295, 364]. Die von Meier und Kenzora berichtete Inzidenz der AVN von ca. 20 % stieg auf 40 %, wenn ein LatR. durchgeführt wurde. Bevor die Osteonekrose radiologisch sichtbar wird, kommt es während bestimmter Operationsschritte („*lateral release*“, Adduktor-Trennung) zu einer messbaren Abnahme des Blutflusses [180]. Mittels eines Laser-Dopplers zeigten Kuhn et al., dass die Kombination aus Chevron-Osteotomie, einer medialen und lateralen Kapselfreisetzung und die Abtrennung der Adduktor-Sehne insgesamt den Blutfluss zum Metatarsalköpfchen um 71 % reduziert. Bei jedem der genannten Operationsschritte resultiert allgemein eine signifikante Abnahme des Blutflusses. Die größte Reduktion lässt sich während der medialen Kapsulotomie nachweisen mit einer durchschnittlichen 45%igen Abnahme des Blutflusses [180].

Eine übermäßige Präparation der Kapsel sehen Klosok et al. gleichermaßen als Ursache für eine mögliche AVN an. Grund dafür ist die These, dass nach erfolgter Osteotomie die einzig verbleibende Blutversorgung des Metatarsalköpfchens durch die Kapsel besteht [175]. Der intraossäre Blutfluss wird durch die distale Osteotomie vollständig unterbrochen und daher muss auf eine exzessive Ablösung der Kapsel mit Verletzung der lateralen Kapselgefäße verzichtet werden [265]. Robinson et al. präzisieren, dass die Versorgung bei der Ablösung der dorsalen, lateralen und inferioren Kapselansätze schwer geschädigt wird. Im Jahre 1987 formulierten Shereff et al. bereits die Empfehlung, dass trotz der ausgeprägten arteriellen Versorgung des Kopfes eine sanfte und sorgfältige Präparation des lateralen sowie dorsalen Weichteilmantels im Rahmen einer Operation dringend notwendig ist [68, 301]. Auch Stukenborg-Colsman et al. empfehlen die lateralen Weichteile um das Metatarsalköpfchen sowie die plantaren und subkapitalen Ansätze der Kapsel zu erhalten. Dies sei notwendig, um die Durchblutung des Köpfchens nicht weiter zu kompromittieren. Für das „*laterale release*“ wird von einigen Autoren ein Zugangsweg von medial transartikulär bevorzugt, um zum einen auf einen weiteren Hautschnitt zu verzichten und um das Risiko einer AVN zu minimieren [52, 328].

Andere Autoren betonen, dass nach einer Chevron-Osteotomie mitsamt LatR. keine avaskuläre Nekrose auftrat [18, 52, 137, 180, 186, 265, 272, 279, 297] oder die Inzidenz nur sehr gering war [50]. Peterson et al. schließen aus einer retrospektiven Studie, dass die Chevron-Osteotomie mit LatR. zwar eine Inzidenz der AVN aufweist, diese aber sehr gering ist (2 %) und damit kein Gegenargument für das kombinierte Prozedere darstellt [265]. Nach einer radiologischen Untersuchung an 88 Füßen, operiert mittels Chevron-Osteotomie und LatR., schlussfolgern die Autoren, dass wenn die Blutversorgung zum Köpfchen und zur Kapsel erhalten bleibt, die Op-Technik un-

wahrscheinlich die Ursache einer klinisch nennenswerten AVN des Metatarsalköpfchens ist [332]. Darüber hinaus gibt es Patientenfälle, die Zeichen einer Osteonekrose zeigen, ohne dass ein LatR. vorgenommen wurde [88, 201]. In einem Review fassen Easley et al. 2007 ebenfalls zusammen, dass eine Kombination aus distaler Chevron-Osteotomie, LatR. und Adduktorsehnenlösung nicht mit einem erhöhten Risiko der Osteonekrose des Metatarsalköpfchens einhergeht [88]. Die Kombination eines knöchernen Eingriffes mit einem LatR. kann zudem bessere Ergebnisse erzielen, als nur die Osteotomie allein [121]. Auch bei perkutanen, minimalinvasiven Verfahren ohne Berührung der Kapsel oder einem LatR. treten Osteonekrosen auf [96, 160].

Insgesamt lässt sich auch hier ein divergentes Bild feststellen, mit gegensätzlichen Empfehlungen und Ergebnissen bezüglich der Anwendung des „*lateral release*“ und Osteotomien [121, 295, 296, 355]. Waizy et al. konkludieren, dass ein Einsatz der Techniken je nach Befund sinnvoll sein kann, doch ein übermäßiger Weichteileingriff birgt das Risiko einer Überkorrektur und einer Verletzung der vaskulären Versorgung des Metatarsalköpfchens. Aus anatomischen Untersuchungen konnten Empfehlungen zum Erhalt der arteriellen Versorgung beim LatR. definiert werden, doch besteht weiterhin Uneinigkeit über die Sicherheit der einzelnen Teilschritte dieses Weichteilverfahrens [295]. Der Zusammenhang zwischen AVN und der Chevron-Osteotomie mit gleichzeitigem LatR. bleibt umstritten [121, 327] und die Ursache einer AVN unbekannt [158].

#### **AVN und minimalinvasive Verfahren**

Weniger Komplikationen und eine Inzidenz der AVN von 0 % nach minimalinvasiven Verfahren werden in der Literatur mehrfach betont [1, 8, 23, 34, 40, 112, 139, 163, 194, 227, 371]. Die minimalinvasiven Techniken haben weniger assoziierte Morbidität durch eine geringere Ablösung des Weichteilmantels [82, 112, 209, 227]. Da auch die Kapsel bei diesen Verfahren nicht durchtrennt wird, ist das Risiko der Gefäßunterbrechung laut Kadakia et al. geringer [160]. Eine Studie nach der minimalinvasiven Operation „SERI“ zeigte an 1000 Füßen stets eine komplette Heilung, auch wenn der Kontakt der Knochenenden bei dieser Technik nur minimal ist. Eine AVN trat in dieser Studie nicht auf. Indes berichteten die Autoren das Auftreten von Rezidiven in 47 behandelten Füßen. An der Austrittsstelle des Kirschnerdrahtes kam es zudem bei 21 Füßen zu leichten Hautinfektionen [111].

Minokawa et al. untersuchten ähnlich wie Kuhn et al. den Blutfluss des Metatarsalköpfchens bei einer minimalinvasiven Chevron-Osteotomie. Sie konkludierten, dass die minimalinvasive Osteotomie des distalen ersten Mittelfußknochens vermutlich den Blutfluss des Mittelfußkopfes nicht beeinflusst [227]. Des Weiteren wird bei der minimalinvasiven Chevron-Osteotomie (PECA) auf die mediale Kapsulotomie, das „*lateral release*“ und die Adduktorsehnedurchtrennung verzichtet. Diese Verfahren erhalten außerdem das Periost an der Osteotomiestelle [8]. Magnan et al. konnten in 118 durchgeführten perkutanen, minimalinvasiven Operationen nicht einen Fall

einer AVN feststellen.

Auch im Bereich der minimalinvasiven Chirurgie herrscht Uneinigkeit in Bezug auf die möglichen Komplikationen [28, 142, 218, 305, 339]. Über das Auftreten einer *Non-union*, einer verzögerten Heilung, einem Rezidiv, einer Infektion oder einer Osteonekrose wurde auch bei minimalinvasiven Verfahren berichtet [28, 81, 82, 96, 139, 142, 160, 179, 339]. Selbst bei erfahrenen Operateuren konnte eine erhöhte Komplikationsrate festgestellt werden [28].

Studien, die das Outcome und die Komplikationen nach minimalinvasiven Verfahren beleuchten, zeigen zudem ein seltenes, aber doch vorhandenes Auftreten der avaskulären Nekrose [1, 142]. Nach 13 minimalinvasiv durchgeführten distalen metatarsalen Osteotomien und Abbruch ihrer Studie, schlussfolgern Kadakia et al., dass dieses Verfahren eine zu hohe Rate an Komplikationen aufweist. Neben der hohen Rezidivrate wird dabei auch die Osteonekrose genannt [160]. Ähnlich berichten Ianno et al. eine Inzidenz von 3,5 % der AVN nach minimalinvasiver distaler Chevron-Osteotomie. Zwei Autoren schlussfolgern nach ihrer anatomischen Untersuchung in Bezug auf die minimalinvasiven Verfahren, dass die gefährdetsten Strukturen der dorsale mediale kutane Ast des N. peroneus superficialis [218] und die arterielle Blutversorgung des ersten Mittelfußkopfes sind [82]. Im Jahr 2017 schlussfolgern Waizy et al., dass in Bezug auf die Wirksamkeit und die Komplikationen der MIS die Studienlage noch unzureichend ist. Die Bedeutung der avaskulären Nekrose für die minimalinvasive Hallux-valgus-Chirurgie ist unklar.

## Zielsetzung

Diese Arbeit soll durch genaue anatomische Beschreibung des Eintrittes der A. nutricia die extraossäre Blutversorgung des ersten Mittelfußknochens charakterisieren und damit für die Hallux-valgus-Chirurgie sichere Regionen beschreiben, in welchen diese nicht verletzt werden kann. Durch die zusätzliche Analyse der intraossären Blutversorgung sollen neue Erkenntnisse und Rückschlüsse auf die Komplikation der avaskulären Nekrose nach Chevron-Osteotomie beschrieben werden. Die Frage, welcher Operationsschritt Ursache der Minderperfusion des ersten Mittelfußköpfchens ist und wie das „*laterale release*“ damit in Zusammenhang steht, soll aus anatomischer Sicht beantwortet werden. Im Zuge dessen werden Thesen über die Funktion von Vater-Pacini-Körperchen an der Arteria nutricia formuliert und in die Biomechanik des ersten Mittelfußknochens und seiner Blutversorgung eingeordnet.

## KAPITEL 2

# Material und Methoden

### **2.1 Körperspenderinnen und Körperspender**

Die Ossa metatarsalia, sowie alle weiteren Gewebeproben, stammen von den Körperspenden aus dem Institut für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Körperspenderinnen und Körperspender haben sich zu Lebzeiten entschieden, ihren Körper zu Studienzwecken, sowie zur medizinischen Aus-, Fort- und Weiterbildung, bereitzustellen. Die Einwilligung dazu liegt jeweils schriftlich vor. Für diese Arbeit besteht ein positives Ethikvotum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät Düsseldorf (Studiennummer *2018-80-ProspDEuA*).

Die Körperspenderinnen und Körperspender wurden zu Beginn in einem institutseigenen Verzeichnis pseudonymisiert registriert und erhielten im Zuge dessen einen numerischen Code, der in dieser Arbeit Berücksichtigung findet. Eine vollständige Anonymisierung der Proben war, aufgrund der zum späteren Zeitpunkt erfolgten Beisetzung, nicht möglich. Die allgemeine Fixierung und Konservierung der Körper erfolgte mittels Formaldehyd mit einer Endkonzentration von 4 % im Gewebe.

Zu Beginn dieser Arbeit sind die Körperspenden im Rahmen des allgemeinen Präparierkurses bereits unter dem Aspekt des Bewegungsapparates von Studierenden der Humanmedizin präpariert worden. Um eine hohe anatomische Varianz wiederzugeben, wurden für diese Arbeit 66 Füße, jeweils rechts und links, von 33 Körperspenderinnen und Körperspendern präpariert (n=33). Mit Ausnahme eines linken Vorfußes, der eine Voroperation am Os metatarsale I aufwies, konnten alle entnommenen Präparate zur Datenerhebung herangezogen werden. Eine zu weit fortgeschrittene Präparation oder Manipulation der ersten metatarsalen Region waren ein weiteres Ausschlusskriterium. Im vorliegenden Kollektiv sind 17 Körper vom männlichen und 16 vom weiblichen Geschlecht (16 ♀, 17 ♂). Das Durchschnittsalter beträgt, bei einer Altersspanne von 52 bis 94 Jahren, 79 Jahre. Vorerkrankungen mit Einfluss auf die Gefäßwand oder die Durchblutung (z. B. Diabetes mellitus, periphere arterielle Verschlusskrankung, Hyperlipidämie) konnten aus Mangel an Hintergrundinformationen nicht berücksichtigt werden.

**Tabelle 2.1:** Liste Chemikalien, Geräte und Materialien

Chemikalien	Usedecalc Decalcifying Solution <sup>®</sup> (MEDITE Germany GmbH, Burgdorf, Deutschland)
	Roticlear <sup>®</sup> , Roti-Mount <sup>®</sup> (Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
	Hämatoxylin nach Gill II (Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
	Isopropanol (Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
	Anilinblau-Orange G-Färbelösung: Anilinblau, Orange G (Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
	Azokarminfärbelösung: Azokarmin G (Carl Roth GmbH und Co. KG, Karlsruhe, Deutschland)
	Formaldehyd (Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland)
	Paraffin (McCormick Scientific, Paraplast Plus, St. Louis, Missouri, USA)
	Eisessig (VWR Internation GmbH, Darmstadt)
	Ethanol (VWR Internation GmbH, Darmstadt)
	Aqua destillata
Geräte	Metallbandsäge BS128 HDR (Holzmann-Maschinen, Haslach, Österreich)
	Reprotisch (Kaiser Fototechnik GmbH und Co. KG, Buchen, Deutschland)
	Spiegelreflexkamera Canon EOS 750 D (Canon Inc., Tokio, Japan)
	Ultrasonic Decalcifying Automat USE 33 (MEDITE Germany GmbH, Burgdorf, Deutschland)
	Einbettstation TES Valida (MEDITE Germany GmbH, Burgdorf, Deutschland)
	Rotationsmikrotom HM360 (Thermo Fisher Scientific, Dreieich, Deutschland)
	Wasserbad Gerät 25900 (MEDAX GmbH und Co. KG, Neumünster, Deutschland)
	Wärmeschrank (Memmert GmbH und Co. KG, Schwabach)
	Mikroskop Zeiss Axioplan (Carl Zeiss AG, Oberkochen)
Materialien	Objektträger 1 mm Stärke (Paul Marienfeld, Lauda Königshofen, Deutschland)
	Einbettkassetten (MEDITE Germany GmbH, Burgdorf, Deutschland)
	Einwegskalpelle Feather disposable Stapel, No. 15/22 (MEDITE Germany GmbH, Burgdorf, Deutschland)
	Mikroreaktionsgefäß 2 ml

## 2.2 *Verwendete Chemikalien, Geräte und Materialien*

Siehe dazu die Tabelle 2.1.

## 2.3 *Präparation*

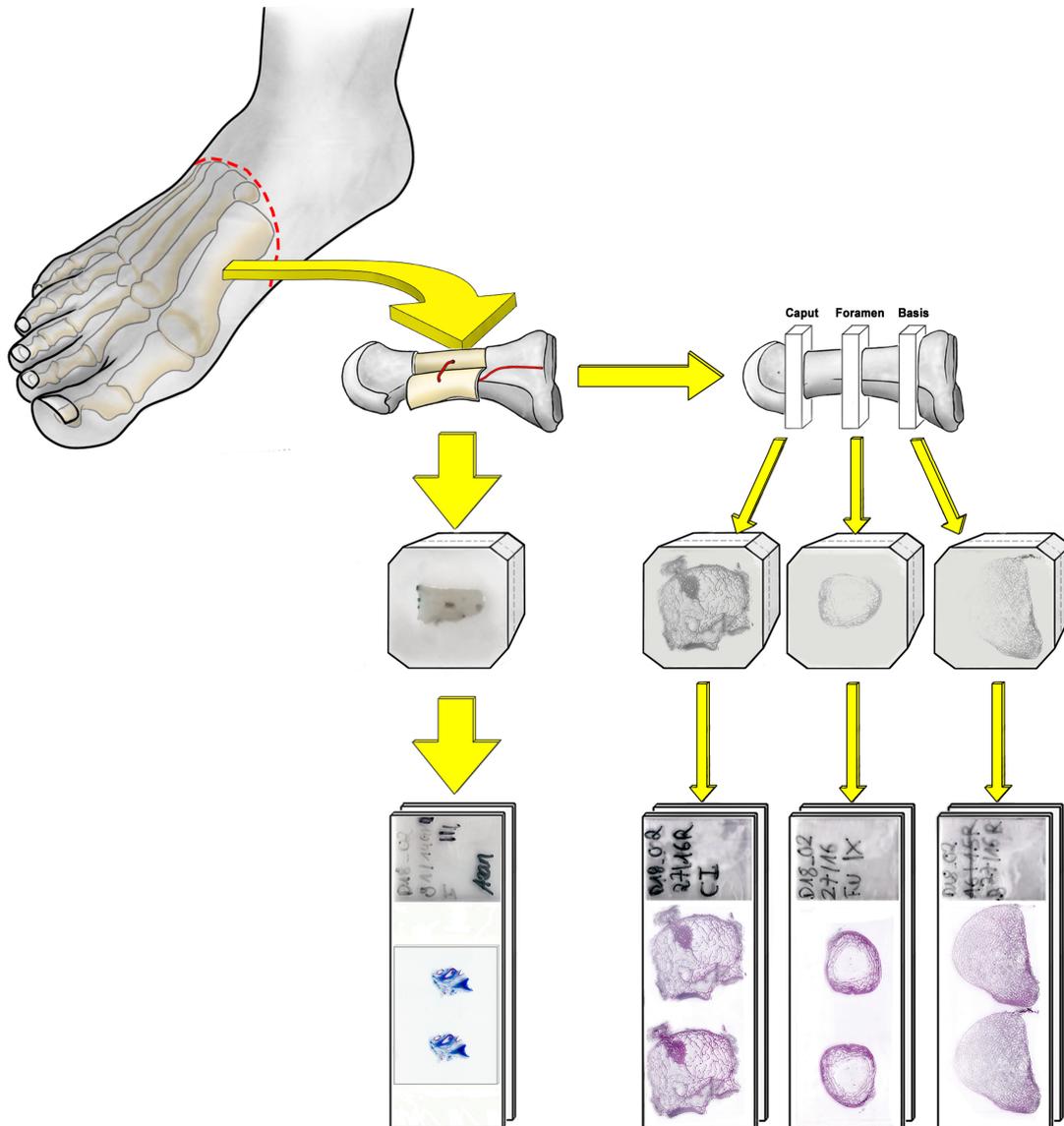
Die Präparation gliederte sich makroskopisch in zwei separate Schritte, die auch hier getrennt voneinander behandelt werden. Zunächst erfolgte eine gröbere Präparation mit dem Ziel der Amputation des gesamten Vorfußes. Dies erleichterte zum einen die feine und sorgfältige Präparation zwischen den Metatarsalknochen, und ermöglichte zum anderen eine platzsparende Lagerung der Präparate. Die genannte feine Präparation bezweckte eine erste Identifikation der A. nutricia und die Entnahme dieser. In einem letzten Schritt erfolgte eine erneute grobe Präparation und Säuberung des Os metatarsale I.

### 2.3.1 *Klinische Vorfußamputation*

Die Arbeitsgrundlage der Vorfußamputation basierte bei allen 66 Füßen auf einer bereits vorangegangenen Präparation. Haut, Subcutis sowie Faszien der Muskulatur waren bereits entfernt worden. Zunächst wurden die Sehnen der Extensoren des Unterschenkels nahe der Phalangen durchtrennt und mobilisiert. Mit Ausnahme der Sehne des M. tibialis anterior wurden die Extensorsehnen weiter proximal auf Höhe des Sprunggelenks abgetrennt. Dies war erforderlich, um einen direkten Zugang in den Tarsometatarsalgelenkspalt zu erhalten. Die noch intakte Sehne des M. tibialis anterior diente als Orientierungspunkt des ersten Gelenkspaltes zwischen Os metatarsale I und dem Os cuneiforme mediale. Aufgrund dessen wurde diese knochenah mit dem Skalpell unterfahren und dadurch abgetrennt. Um den Gelenkspalt darzustellen, wurde mit einer spitzen Pinzette das Bindegewebe 2-3 cm lateral der Ansatzsehne abgezogen (s. Abb. 2.2a). Das weitere Vorgehen orientierte sich an der traditionellen Amputation des Vorfußes nach *Lisfranc*<sup>7</sup> innerhalb des tarsometatarsalen Gelenkspaltes. Dabei erfolgte das Absetzen des Vorfußes zwischen der jeweiligen Basis der Ossa metatarsalia und der distalen Fläche der Ossa cuneiformia bzw. des Os cuboideum [149]. Am Os metatarsale II war es notwendig 1-2 cm weiter proximal den Gelenkspalt mit dem Skalpell zu eröffnen (s. Abb. 2.2b). Plantare Strukturen, wie die Plantaraponeurose oder die kurzen Fußmuskeln, wurden vor dem kompletten Abtrennen des Vorfußes mit einem diagonalen Schnitt tief von medial nach lateral durchtrennt. Die amputierten Vorfüße wurden in 70 %igem Isopropanol gelagert.

---

<sup>7</sup>Jacques Lisfranc de Saint-Martin war ein französischer Chirurg [108], der bei Amputationen sich an der an der tarsometatarsalen Gelenklinie orientierte [195].



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler

**Abbildung 2.1:** Übersicht der Arbeitsschritte. Obere Reihe: Amputation des Vorfußes nach *Lisfranc* (gestrichelte rote Linie) mit anschließender Präparation der A. nutricia (rot) und Herausnahme von drei Knochenproben (Caput, Foramen, Basis). Mittlere Reihe: Proben der Arterie und Knochen jeweils in Paraffinblöcken. Untere Reihe: nach Schnitt am Mikrotom Proben der Arterie und Knochen auf Objektträgern (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler).



**Abbildung 2.2:** Teilschritte der makroskopischen Präparation am Vorfuß zur Amputation nach *Lisfranc*; a: Freilegung des TMT-Gelenkspaltes mittels Pinzette; b: Schnittführung zur vollständigen Amputation des Vorfußes.

### 2.3.2 Makroskopische Präparation der Metatarsalregion

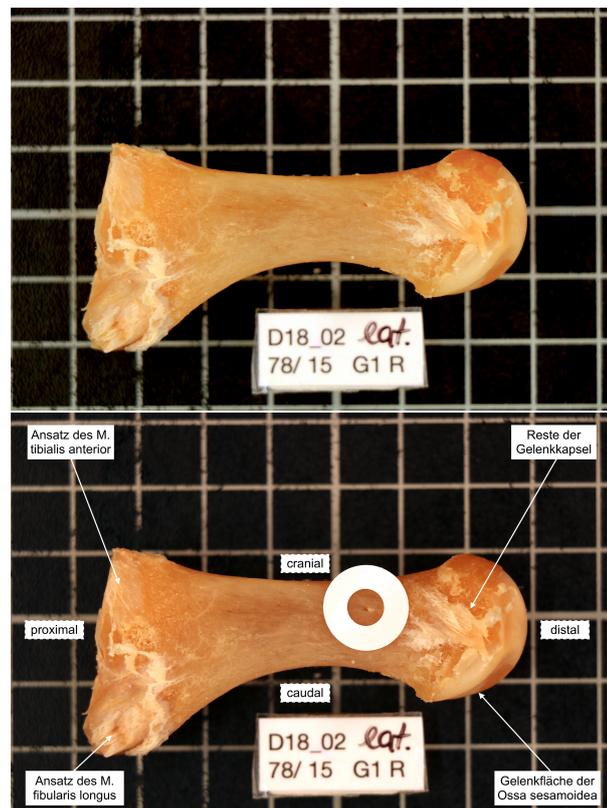
Die weitere Präparation am amputierten Vorfuß verfolgte das Ziel die *A. nutricia* mit ihrem Eintritt in den Knochen darzustellen. Um die Präparation im ersten metatarsalen Raum zu erleichtern, wurde der gesamte erste Strahl vom zweiten getrennt. Dies gelang mit einem Schnitt von distal, beginnend zwischen den Phalangen des ersten und des zweiten Strahls, nach proximal bis zur Basis des Os metatarsale I. Dabei wurde stets an der medialen Seite des zweiten Mittelfußknochens präpariert, um die *A. nutricia* des Os metatarsale I unversehrt zu belassen. Am nun abgetrennten ersten Strahl waren der *M. interosseus plantaris* sowie der *M. interosseus dorsalis* deutlich sichtbar geworden. Oftmals konnten in diesem Teil der Präparation bereits zum Knochen verlaufende arterielle Äste der *A. metatarsalis plantaris* identifiziert werden.

Um die genannten Muskeln zu mobilisieren, war es essentiell die Gelenkkapsel im Großzehengrundgelenk zu eröffnen und die proximale Phalanx zu entfernen. Die Sesambeine, die Sehne des *M. adductor hallucis*, sowie die des *M. abductor hallucis*, wurden mit dem Ablösen der Gelenkkapsel ebenfalls entfernt. Es folgte ein horizontal verlaufender Schnitt auf der gesamten cranialen Fläche des Os metatarsale I. Entlang dieser Schnittlinie wurde daraufhin stumpf und schrittweise Bindegewebe sowie Periost vom Knochen nach caudal abgezogen. In diesem Schritt war besondere Vorsicht geboten, um den Eintritt der *A. nutricia* nicht zu übersehen. Sofern diese dargestellt werden konnte, wurde sie aus dem neu geschaffenen Weichteillappen heraus präpariert. Dazu wurde in den Lappen aus Bindegewebe, Periost und Muskulatur von periostaler Seite aus ein ca. 1 cm x 1 cm großes Quadrat, mit der *A. nutricia* als Zentrum, geschnitten. Zur

finalen Mobilisation der Arterie war noch ein scharfes Abtrennen nah am Foramen nutricium vonnöten. Die Probe wurde in einem 2 ml Mikroreaktionsgefäß, gefüllt mit 70 % Isopropanol, aufbewahrt. Nach Entnahme aller Proben wurde die jeweilige A. nutricia, unter Zuhilfenahme eines Filterpapiers, in eine Einbettkassette gelegt und in 60 % Isopropanol gelagert.

### 2.3.3 Präparation des Os metatarsale I

Nachdem die A. nutricia entnommen wurde, stand die Säuberung des Os metatarsale I im Vordergrund. Die restlich vorhandenen Flexoren der Großzehenloge wurden entfernt, Sehnen und Periost weitestgehend stumpf abgeschabt. Zur räumlichen Orientierung wurde der Ansatz der Sehne des M. fibularis longus belassen (s. Abb. 2.3). Hintergrund der Entfernung aller Weichteile war die standardisierte, fotografische Aufnahme aller 65 Ossa metatarsalia mit anschließender digitaler Messung der Position des Foramen nutriciums (s. Kap. 2.8.2).



**Abbildung 2.3:** Fotografie des Os metatarsale I nach Entnahme; oben: Endergebnis der Knochenpräparation; unten: Ansicht auf die laterale Fläche des Os metatarsale I mit Markierung des Foramen nutriciums (Quelle: eigene Darstellung).

## 2.4 Fotografie des Os metatarsale I

Die standardisierte Fotografie wurde mit der digitalen Spiegelreflexkamera *Canon EOS 750 D* durchgeführt. Um einheitliche Bedingungen von Belichtung, Untergrund und Vergrößerung zu schaffen, wurde ein Reprotisch mit integriertem Stativ verwendet. Des Weiteren verfügte dieser über eine Beleuchtungseinrichtung mit 4 Einschraubfassungen für Lampen bis 150 Watt. Eine mattschwarze, beschichtete Grundplatte mit einem aufgedruckten Feinraster (cm-Skala) ermöglichte ein reflexfreies Fotografieren der Knochen. Die Kamera wurde mithilfe eines höhenverstellbaren Kameraarmes an einer 100 cm hohen Führungssäule befestigt. An dieser wurde ein Abstand von 40 cm zwischen Knochen und Kamera eingestellt. Der abzulichtende Knochen wurde mittig positioniert und Blöcken aus Styropor stabil gehalten. Am Objektiv wurde die maximal mögliche Vergrößerung eingestellt. Alle Aufnahmen erfolgten im Kreativprogramm „Programmautomatik“ (**P**). Dabei ließ sich manuell das Autofokusfeld innerhalb von 19 Messfeldern festlegen. Bei der jeweils unterschiedlichen Position des Foramen nutricium bot dies den Vorteil, den Autofokus pro Knochen an das Foramen manuell anzupassen. Von jedem Knochen wurden 2 Fotos angefertigt, wovon jeweils eines mit und eines ohne Markierung des Foramens ist. Zur Markierung wurden handelsübliche Verstärkungsringe verwendet (siehe Abb. 2.3).

## 2.5 Bearbeitung der Knochen

Um eine Aussage über die Varianz der Durchblutung an unterschiedlichen Regionen des Os metatarsale I treffen zu können, war es erforderlich den Knochen in drei Segmente zu teilen: *Caput*, Schaft mit *Foramen nutricium* und *Basis*. Bevor diese Bereiche aus dem Knochen gesägt wurden, erhielten diese eine einheitliche Markierung. Ziel dabei war es die Stellen des Knochens herauszusägen, die auch bei der Osteotomie, im Rahmen einer Hallux-valgus-Operation, relevant sind (s. Kap. 1.3.2). Die klinische Grundlage der ersten Markierung war die Chevron-Osteotomie. Bei dieser erfolgt die Markierung des Scheitelpunktes der Osteotomie zentral im Metatarsalköpfchen [335]. Von diesem zentralen Punkt wurden noch 5 weitere Millimeter in einer horizontalen Linie nach proximal gemessen, um sich im genauen Verlauf des Osteotomiewinkels zu befinden. Die zweite Markierung umschloss vollständig den Bereich des Foramen nutricium. Vom Tarsometatarsalgelenk aus wurden 10 mm gerade nach *distal* abgemessen und markiert. Diese Markierung richtete sich nach den bei schwerer Hallux-valgus-Deformität angewandten proximalen Basisosteotomien (z. B. „*opening wedge*“ oder „*Crescentic-Osteotomie*“)<sup>8</sup> [335, 366]. Zur Stabilisierung wurden alle Knochen zuerst in Isolierband eingewickelt, in einer Halterung mit Feststellschrauben fixiert und beim Sägen, unter Zuhilfenahme von Silikonmatten, in Position

<sup>8</sup>Bei „*opening wedge*“- und „*Crescentic-Osteotomie*“ erfolgt die Osteotomie an der Basis des ersten Mittelfußknochens, wobei bei der „*opening wedge*“ ein Keil entnommen wird.

gehalten. Mit einer Metallbandsäge wurden aus dem jeweiligen Knochen an den Markierungen die drei Segmente herausgesägt. Die Breite der Segmente variierte zwischen ca. 3 und 8 mm.

### 2.5.1 Entkalkung

Zur Entkalkung wurde jedes Knochensegment in eine eigene Einbettkassette überführt und die Proben im Ultraschall-Entkalkungsautomat mit der Lösung „USERAPID®“ für 9 Tage radikal entkalkt. Diese Methode wurde bevorzugt, da die schonende Entkalkung, auf der Basis von Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA), bei dieser Anzahl an Proben mehrere Monate in Anspruch genommen hätte. Innerhalb der beschriebenen 9 Tage wurde die Lösung 2-mal erneuert. Nach der ultraschall-assistierten Entkalkung wurden die Kassetten in der „USEDECALC®“ für einen Monat schonend entkalkt und gelagert. Um das Resultat zu überprüfen, wurden die Knochenproben stichprobenartig aus der Lösung entnommen und mittels Palpation die Konsistenz getestet. Eine gummiartige Beschaffenheit wies auf den Erfolg der Entkalkung hin.

## 2.6 Histologie

Sowohl die Auswertung der Knochenarchitektur, als auch die der Gefäßproben (s. Kap. 2.3.2) erfolgte auf Grundlage histologischer Bilder. Das Vorgehen und die anschließenden Färbungen waren bei beiden Probenotypen identisch und werden hier gemeinsam beschrieben. Von den 65 Knochenproben wurden lediglich von 30 Knochen (15 Körperspender, rechter und linker Fuß) histologische Schnitte angefertigt. Grund dafür war das aufwendige und nicht immer mögliche Schneiden der zum Teil noch sehr stabilen Knochen. Alle Proben befanden sich zu dem Zeitpunkt in Kassetten, die für 2 Tage in einen Entwässerungsautomaten gelegt wurden. Die Entwässerung erfolgte in mehreren Schritten:

- Aufsteigende Alkoholreihe mit 50 %, 70 %, 90 %, 96 %, 100 % Isopropanol für jeweils 3-4 Stunden (insg. 27 h)
- Überführen ins Intermedium „Roticlear®“ für insg. 11 h
- Für weitere 10 h Lagerung in 60° Celsius warmem flüssigen Paraffin

Danach wurden die Kassetten an einer Einbettstation in eine passende Schale gelegt und auf einer 65° C warmen Platte mit flüssigem Paraffin befüllt. Auf einer -2° C kalten Platte erstarrte das Paraffin und konnte nach 20-30 Minuten aus der Schale gelöst werden. Vor dem Schneiden der Paraffinblöcke wurden diese bei 5° C über Nacht im Kühlschrank gelagert und unmittelbar davor eine Stunde auf Eis. Am Rotationsmikrotom wurden Schnitte von 6 µm Dicke erstellt und im 37° C warmen Wasserbad auf Objektträger überführt. Die folgenden Anleitungen und

Methoden der Färbungen sind institutseigen und modifiziert nach „*Romeis - Mikroskopische Technik*“ [236].

### 2.6.1 Hämalaun-Eosin-Färbung

Die Übersichts- und Kernfärbung mit Hämalaun und Eosin wurde bei den 90 Knochenschnitten angewendet. Ziel dabei war es, einen starken Kontrast zwischen den Havers-Kanälen und den Osteonen im Knochengewebe zu erzeugen.

- Hämatoxylinlösung nach Gill II:
  - Ansetzen einer Lösung aus 730 ml Aqua destillata und 250 g Ethylenglykol
  - darin 2 g Hämatoxylin, 0,2 g Natriumiodat und 17,6 g Aluminiumsulfat lösen
  - Hinzufügen von 20 ml Eisessig und ca. 1h bei Raumtemperatur mischen
  - vor dem Färben Lösung filtern
  
- Methode:
  1. Präparate im Wärmeschrank bei 70° C für 2 Stunden lagern
  2. Entparaffinieren in warmem „Roticlear<sup>®</sup>“ für 15 min; weitere 5 min in „Roticlear<sup>®</sup>“ bei Raumtemperatur
  3. Rehydrieren in absteigender Alkoholreihe: 100 %, 100 %, 96 %, 90 % und 70 % für je 3 min
  4. in demineralisiertes vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) 3 min stellen
  5. ca. 10 Sekunden färben in Hämatoxylinlösung nach Gill II
  6. stehend (nicht fließend) im normalen Leitungswasser 2 min „bläuen“
  7. in 1%igem Eosin für 2 min färben
  8. stehend auswaschen in Leitungswasser für 1 min
  9. Dehydrieren durch aufsteigende Alkoholreihe: 70 %, 90 %, 96 %, 100 %, 100 % für jeweils 30 sec
  10. Eliminierung des Alkohols durch 1 min Lagerung in Xylol I, II, III
  11. Eindecken mit Einschlussmittel „Roti<sup>®</sup>- Mount“

### 2.6.2 Elastika-van-Gieson-Färbung

Die Kombination der Resorcinfuchsinfärbung nach Weigert (Elastika-Färbung) und der Van Gieson-Färbung ermöglichte eine anschauliche Beurteilung der elastischen Fasern sowie eine Differenzierung von Bindegewebe und Muskulatur. Bei allen entnommenen Gefäßproben konnte dadurch eine eindeutige Identifikation der *A. nutricia* stattfinden, die eine dunkelviolett gefärbte Membrana elastica interna aufwies.

- Eisenhämatoxylin nach Weigert:
  - Herstellen der Stammlösungen *Weigert A* und *Weigert B*
    - \* *Weigert A*: in 100 ml 96%igem Ethanol 1 g Hämatoxylin lösen
    - \* *Weigert B*: in 99 ml Aqua des. 1,16 g  $\text{FeCl}_3$  auflösen und 1 ml 25%ige Salzsäure (HCl) hinzufügen
  - beide Lösungen vor Gebrauch im selben Verhältnis mischen
- Resorcinfuchsinlösung (sog. Elastika-Lsg.):
  - Ansetzen zweier Lösungen:
    - \* unter Wärme 0,5 g basisches Fuchsin mit 1,0 g Resorcin in 50 ml Aqua des. lösen
    - \* 2,0 g von Eisen-III-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) in 10 ml Aqua des. auflösen
  - Lösungen zusammengeben, erhitzen und bei niedriger Flamme 5 min kochen lassen
  - nach dem Abkühlen, Mischung filtrern, Filtrat entsorgen und Filtrerrückstand mitsamt Filter in Behältnis geben
  - zum Lösen des Rückstandes 70-100 ml Ethanol (96 %) hinzugeben und Mischung vorsichtig erhitzen
  - 0,7 ml konzentrierte Salzsäure (HCl) in wieder erkaltete Lösung geben und filtrieren
- Pikrofuchsin-Lösung (auch van-Gieson-Gemisch):
  - Erstellen einer gesättigten wässrigen Pikrinsäurelösung
    - \* bei Raumtemperatur in 1000 ml Aqua des. ausreichend Pikrinsäurekristalle lösen bis Bodensatz entsteht
  - 100 ml der Pikrinsäurelösung filtrern, 5 ml 1%ige wässrige Säurefuchsinlösung hinzugeben
- Methode:

1. Präparate im Wärmeschrank bei 70° C für 2 h in Xylol entparaffinieren
2. Lagerung für 2 min je 100 %, 100 %, 96 %, 90 % und 70 % absteigender Alkoholreihe
3. für 15 min in Resorcinfuchsinlösung färben
4. Auswaschen in demineralisiertem Wasser (VE-Wasser)
5. 5 min färben in Eisenhämatoxylin nach Weigert
6. Auswaschen in demineralisiertem Wasser (VE-Wasser)
7. bei fließendem Leitungswasser für 10 min „bläuen“
8. Auswaschen in demineralisiertem Wasser (VE-Wasser)
9. Überführen für 1 min in Pikrofuchsinlösung
10. 2-malig Auswaschen in demin. Wasser (VE-Wasser)
11. in 96%igem Alkohol sowie in absolutem Alkohol 2-mal jeweils dehydrieren
12. Bereinigen vom Alkohol in Xylol I und II für je 2 min
13. Eindecken mit „Roti<sup>®</sup>- Mount“

#### 2.6.3 Azanfärbung nach Heidenhain

Neben der Elastika-van-Gieson-Färbung wurden alle Gefäßproben mit der Übersichtsfärbung nach Heidenhain gefärbt. Die ersten histologischen Bilder waren nicht zufriedenstellend gefärbt, was einen Zwischenschritt erforderlich machte. Dies war mit der erheblichen Dauer der Formalinfixierung und der vermutlich damit einhergehenden Schädigung des Gewebes zu begründen. Für ein besseres Farbergebnis wurde der Puffer „PBS“ (*phosphate-buffered saline*) angesetzt und in einem Zwischenschritt verwendet.

- Anilinalkohol
  - 100 ml 90%iger Ethanol mit 0.1 ml Anilin versetzen
- essigsaurer Alkohol
  - 100 ml 96%iger Ethanol mit 1 ml Eisessig mischen
- Phosphat-gepufferte Salzlösung (PBS; *phosphate-buffered saline*):

- 160 g Natriumchlorid (NaCl), 4 g Kaliumchlorid (KCl), 4 g Kaliumdihydrogenphosphat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) sowie 25 g Di-Natriumhydrogenphosphat-Dihydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) lösen in 2000 ml Aqua dest.
- vor Einsatz auf 1/10 verdünnen
- Azokarminlösung:
  - 0,1 g Azokarmin G in 100 ml Aqua dest. auflösen, einen Moment aufkochen und filtrieren
  - je 100 ml Filtrat 1 ml Eisessig zugeben
- Anilinblau-Orange-Gemisch:
  - 0,5 g Anilinblau, 2 g Orange G in 100 ml Aqua dest. lösen
  - 8 ml Eisessig zugeben und kurz aufkochen lassen
  - nach Erkalten filtrieren
- Methode:
  1. Präparate 15 min bei 60° C im Wärmeschrank lagern, entparaffinieren in Xylol I und II jeweils 15 min
  2. Rehydrieren durch absteigende Alkoholreihe: 100 %, 100 %, 96 %, 90 %, 70 %, 50 % für je 3-5 min
  3. Lagerung für 3 min in demineralisiertem Wasser (VE-Wasser)
  4. angesetzter PBS-Puffer für 5 min einwirken lassen
  5. Präparate für 5 min in Anilinalkohol überführen
  6. Färben in vorgewärmter Azokarminlösung bei ca. 56° C im Wärmeschrank
  7. Abspülen in kalter Azokarminlösung für 10 min
  8. Differenzieren bis nur noch Zellkerne gefärbt sind in Anilinalkohol für 1 min
  9. Auswaschen in essigsaurem Alkohol für 1 min; Prüfung der Rotfärbung des Gewebes: bei starker Rotfärbung erneut in Anilinalkohol lagern
  10. Entfärben in 5%iger Wolframatophosphorsäure für ca. 40 min

11. für 15 min in Anilinblau-Orange-Gemisch (Verhältnis 1:2 mit Aqua destillata)
12. mit 96%igem Ethanol differenzieren bis Gewebestandteile scharf hervortreten (evtl. unter mikroskopischer Kontrolle)
13. Entwässern in absteigender Isopropanolreihe
14. Entfernung des Alkohols in Xylol I, II, II und Eindecken mit „Roti<sup>®</sup>- Mount“

#### **2.6.4 Immunhistochemie**

Bei einer ersten Inaugenscheinnahme der gefärbten Gefäßpräparate ließen sich neben typischen nervalen Strukturen um die A. nutricia auch Mechanorezeptoren erkennen (s. Kap. 3.2). Um hierbei eine weitere Einteilung der jeweiligen Fasern (in myelinisierte und nicht-myelinisierte Fasern) vornehmen zu können, wurde eine immunhistochemische Färbung („*Myelin Basic Protein*“ und „*Anti-Tyrosine-Hydroxylase Antikörper*“) getestet. Durch den langen Aufbereitungsprozess und Fixierung der Proben, war nicht von einem ausreichenden Farbergebnis der Strukturen auszugehen, weshalb nach der Testung an einzelnen Präparaten dieses Vorhaben nicht weiter verfolgt wurde.

#### **2.7 Histologische Auswertung**

Aufgrund von fehlerhafter Präparation oder Beschädigung der A. nutricia eigneten sich für die histologische Auswertung von den ursprünglichen 65 nur 61 der Gefäßproben. Bei den Knochenschnitten hingegen konnten alle 90 erstellten histologischen Präparate mikroskopisch begutachtet werden. Hierzu wurde ein Lichtmikroskop mit angeschlossener Mikroskopkamera der Firma *Motic* verwendet. Die Aufnahmen und deren Bearbeitung erfolgten mithilfe der Programme „*Motic Images Devices*“ und „*Motic Images Plus 3.0*“ (Motic China Group Co., 2015). Zur Dokumentation der visuell erfassten Merkmale aller Proben wurde das Tabellenkalkulationsprogramm „*numbers*“ (Apple Inc., Version 6.2, 2019) genutzt. Die erfassten Variablen sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Bei den 90 Knochenschnitten wurden jeweils 3 unterschiedliche Regionen aufgenommen. Im bestmöglichen Falle spiegelten am jeweiligen Knochenschnitt diese drei Regionen zugleich die drei Seiten des Knochens (lateral, medial, plantar) wider. Dies war von Relevanz, um die Verteilung und Dichte der Havers-Kanäle auf die gesamte Knochenstruktur, und nicht nur auf eine Teilregion (z. B. mediale Seite), beziehen zu können.



## 2.8 Auswertung mit ImageJ

Sowohl für die Positionsmessung des Foramen nutriciums als auch für die Erfassung der Havers-Kanäle wurde das Bildbearbeitungsprogramm *ImageJ*<sup>9</sup> (Version 2.0.0, Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA) mit der Erweiterung BioVoxxel<sup>10</sup> (The BioVoxxel Image Processing and Analysis Toolbox, Brocher, EuBIAS-Conference, 2015) verwendet.

### 2.8.1 Zählung der Havers-Kanäle

Insgesamt wurden von den Knochenschnitten 270 Aufnahmen angefertigt, da pro Abschnitt (Caput, Foramen, Basis) drei unterschiedliche Regionen betrachtet wurden. Selektiert wurden dabei Bereiche des Knochens, die unbeschädigt, einen hohen Farbkontrast und vom Anschein her, eine hohe Dichte an Havers-Kanälen aufwiesen. In diesen ausgewählten Regionen wurde innerhalb einer  $1\text{ mm}^2$  großen Fläche die Anzahl der Havers-Kanäle, der Flächenanteil des Knochens, der Flächenanteil der Havers-Kanäle gesamt, sowie der Flächenanteil der Kanäle innerhalb der Knochensubstanz gemessen. Letzteres gab Rückschlüsse auf den prozentualen Flächenanteil des Knochens, der für die Durchblutung genutzt wird.

Zunächst wurde, unter Zuhilfenahme einer miterfassten  $1000\text{-}\mu\text{m}$ -Skala, die Skalierung der Pixel im Bild vorgenommen. Einheitlich galten für alle Bilder  $0,6052$  Pixel pro ein Mikrometer ( $0,6052$  pixels/ $\mu\text{m}$ ). Weiter wurde das jeweilige Bild zu einer Farbtiefe von 8-Bit reduziert (s. Abb. 2.4). Für die Analyse war ebenfalls die Erzeugung eines Binärbildes vonnöten. Ein *Threshold* mit der Methode „Default“ (Graustufen von 0 bis 128) wurde angewandt. So konnten weiße Objekte (hier Havers-Kanäle) in schwarzer Umgebung und auf rotem Hintergrund erkannt werden. Abschließend wurde eine  $1\text{ mm}^2$  große Region erstellt und über einen Bereich des Knochens gelegt. Innerhalb dieses  $1\text{ mm}^2$  erfolgte die Analyse der Partikel. Durch das Tool „synchronize windows“ konnte mit einem Cursor im Originalbild die Erfassung der Havers-Kanäle auf ihre Richtigkeit händisch geprüft werden. Alle Ergebnisse wurden in einer Tabelle festgehalten.

### 2.8.2 Positionsmessung des Foramens

Die Messung der Position des Foramen nutriciums am Os metatarsale I erfolgte anhand der angefertigten Fotografien (s. Kap. 2.4). Zu Beginn wurde im Programm *ImageJ* erneut die Skalierung angepasst. Hierbei ließ sich optimal die mit abgelesene Cm-Skala des Reptiles verwenden. Einem Millimeter entsprachen  $67,8026$  Pixel ( $67,8026$  pixels/mm). Unter Verwendung einer Messfunktion konnte die Gesamtlänge des Knochens und die Position des Foramen nutriciums, vom Tarsometatarsal- sowie vom Metatarsophalangealgelenk aus, gemessen werden.

<sup>9</sup><https://imagej.net/Welcome>.

<sup>10</sup><http://www.biovoxxel.de>.

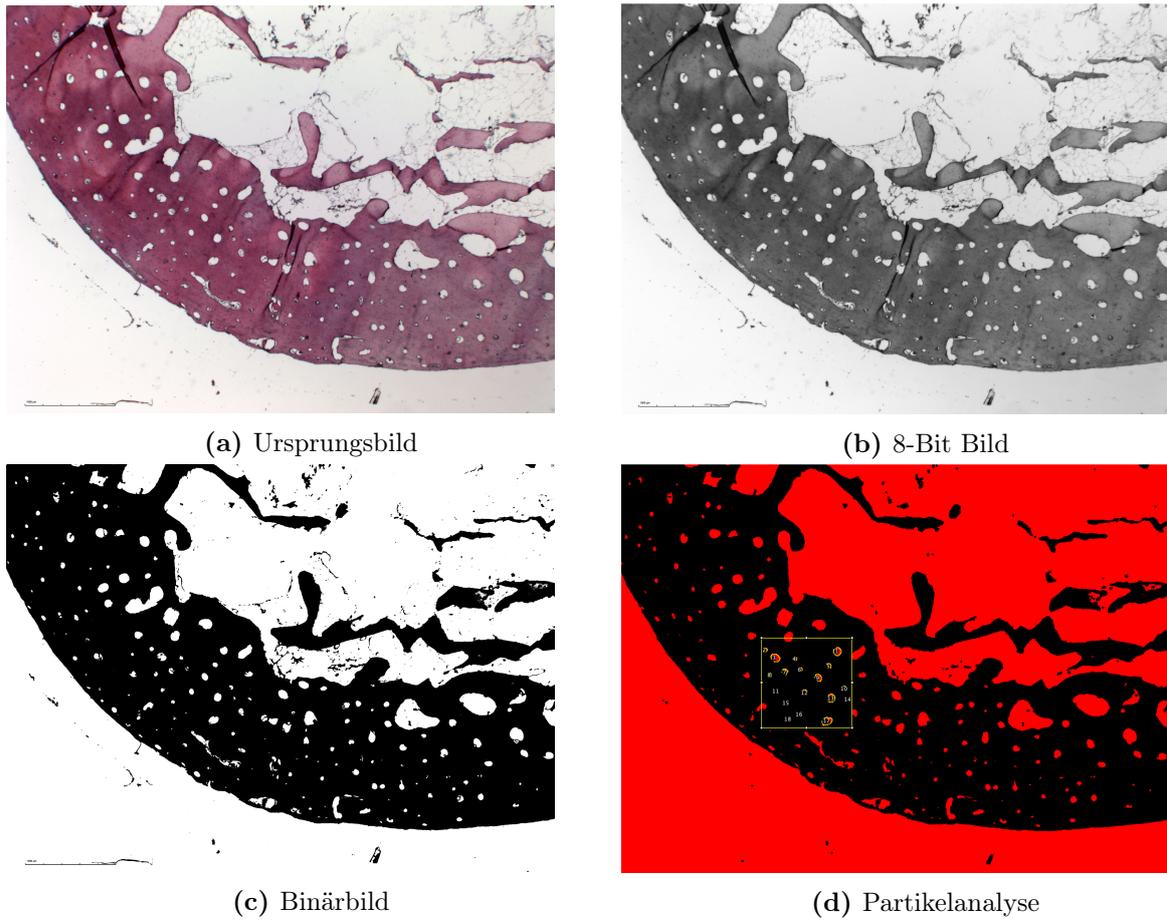
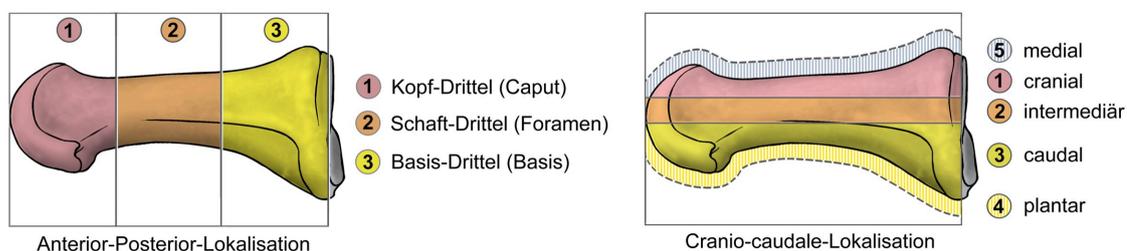


Abbildung 2.4: Einzelschritte der Bildbearbeitung mit *imageJ*.

Dabei wurde jeweils vom äußersten Punkt des Gelenkes aus in gerader Linie mittig zum Foramen gemessen. Die Anzahl der Foramina wurde erfasst. Zur präziseren Beschreibung der Lokalisation wurden weitere Variablen definiert. In Längsrichtung wurde der Knochen in die Bereiche *Kopf*, *Schaft* und *Basis* gedrittelt („*anterior-posterior-Position*“). Je nach Lokalisation des Foramens wurden die Ziffern 1 bis 3 vergeben (1= vorderes „Kopf-Drittel“, 2= mittleres „Schaft-Drittel“, 3= hinteres „Basis-Drittel“). Die horizontale Ebene, auch als „*cranio-caudale-Position*“ bezeichnet, umfasst fünf mögliche Positionspunkte des Foramen nutriciums. Die Ziffer fünf (5) entspricht dabei der gesamten medialen Region des ersten Mittelfußknochens. Die laterale Seite unterteilt sich in eine craniale (1), eine intermediäre (2), eine caudale (3) sowie eine plantare Zone (4). Eingeteilt wurde nach visuellem Eindruck und die Resultate in einer Tabelle erfasst.



Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler

**Abbildung 2.5:** Auswertung anhand von definierten Regionen des Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler.)

## 2.9 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden in einfachen Tabellen mit dem Programm „*numbers*“<sup>11</sup> erfasst und anschließend für die statistische Auswertung in die Analyse-Software IBM SPSS Statistics<sup>12</sup> übertragen.

### 2.9.1 Auswertung der makroanatomischen Daten

Die Lokalisation des Foramen nutriciums wurde anhand des oben beschriebenen Schemas zwei-dimensional erfasst (siehe Kap. 2.8.2). Aus den bezifferten Regionen ließen sich anschließend 15 Kombinationen beschreiben, die dann die Lokalisation des FN in beiden Ebenen widerspiegelte. In einigen Proben konnten mehr als ein Foramen festgestellt werden. Dasselbe genannte Schema für das Zweite zu beschreibende Foramen wurde separat angewandt (ap-Lokalisation 2 und

<sup>11</sup><https://www.apple.com/de/numbers/>; Version 6.2.1 (6529).

<sup>12</sup><https://www.ibm.com/de-de/products/spss-statistics>; Version 26.0.0.0.

$$\left( \frac{68,80\text{mm}(\text{Standardknochenlänge})}{64,43\text{mm}(\text{Knochen 1})} \right) = 1,036(\text{Faktor}) * 35,75\text{mm}(\text{Abstand}) = 37,06$$

**Tabelle 2.4:** Rechnung des jeweiligen Faktors.

ccp-Lokalisation 2). Da drei Foramina nur in einer Probe festgestellt werden konnten, wurden die beschriebenen Variablen hierbei nicht erfasst. Die Variablen zur Erfassung der Lokalisation sind nominalskaliert. Mit SPSS wurde eine deskriptive Datenauswertung vorgenommen und die jeweiligen Häufigkeiten ermittelt (s. Kap. 3.1.1). Zur grafischen Darstellung wurden Balken- und Kreisdiagramme mit den prozentualen Werten verwendet.

Wie in Abschnitt 2.8.2 beschrieben, wurde für eine exakte Ausmessung der Position in mm des Foramens zwei Messpunkte bestimmt. Zum einen wurde digital der Abstand zum Foramen vom Metatarsophalangealgelenk und zum anderen der proximale Abstand vom Tarsometatarsalgelenk gemessen. Mitsamt den gemessenen Werten der jeweiligen Knochenlänge in mm, ließen sich für einen theoretischen Standardknochen Regionen definieren, in denen die Arterie während einer Osteotomie getroffen werden könnte. Dazu wurde für die in 65 Proben gemessenen Längen in mm eine deskriptive Statistik angewendet und der Mittelwert, der Median, das Minimum und Maximum, das 95 % Konfidenzintervall und die Extremwerte ermittelt. Parallel wurden die Daten auf eine Normalverteilung mit dem Kolmogorow-Smirnow- und Shapiro-Wilk-Test überprüft. Der Mittelwert  $M$  der Knochenlänge von 66,80 mm wurde als Standardgröße definiert und die jeweils gemessenen Werte (Abstand vom TMT- und MTP-Gelenk) auf einen Standardknochen angepasst. Hierzu diente ein Faktor, der den Quotienten aus der Standardknochenlänge durch die jeweils gemessene Knochenlänge darstellte (siehe Tab. 2.4). Der für jeden einzelnen Knochen errechnete Faktor wurde mit den gemessenen Abständen multipliziert, wodurch die Werte vergleichbar wurden. Mit diesen auf den Standardknochen angepassten Werten wurde die genannte deskriptive Statistik wiederholt.

## 2.9.2 Auswertung der mikroskopischen Daten

Die Eigenschaften der *A. nutricia* wurden ebenfalls in einer Tabelle zusammengefasst. Im Mittelpunkt der Beschreibung standen die begleitenden Strukturen der Arterie und deren räumliche Beziehung zu dieser. Relevant waren das Vorkommen einer begleitenden Vene, eines zugehörigen Nervens, Propriosensoren (Vater-Pacini-Körperchen) einer Bindegewebsscheide sowie Anschnitte von Muskulatur. Von jedem Körperspender wurden zwei histologische Schnitte auf die Präsenz der zuvor genannten Strukturen unter dem Lichtmikroskop visuell geprüft. Eigenschaften des Vater-Pacini-Körperchen (VPK) wurden anhand folgender Variablen präziser beschrieben: An-

**Tabelle 2.5:** Effektstärke

	<b>schwach</b>	<b>mittel</b>	<b>stark</b>
<i>Effektstärke r</i>	0,1-0,3	0,3-0,5	>0,5

nach Cohen [53]

zahl der VPK, Lokalisation in Bindegewebsscheide, zugehöriger Nerv am VPK, umliegende Bindegewebskapsel. Zudem wurden die histologischen Bilder ins Programm „*imageJ*“ eingefügt und der Abstand eines VPK zur A. nutricia in  $\mu\text{m}$  gemessen. Für die folgende deskriptive Statistik wurde eine einheitliche Codierung verwendet. Die Ziffer Null (0) steht für das Fehlen der jeweiligen Struktur, eine Eins (1) wurde bei Existenz vergeben. Fehlende Werte erhielten die Zahl 99. In SPSS wurden für jede Variable die statistischen Häufigkeiten ermittelt und mittels Balkendiagrammen dargestellt. Für die Auswertung der Haverskanaldichte wurden zwei Messvariablen aus den Ergebnissen der Partikelanalyse (s. Kap. 2.8.1) zusammengesetzt. Die prozentuale Fläche des Knochens innerhalb des gemessenen Quadratmillimeters ergibt sich aus dem Quotienten des mittleren Graustufenwertes und des maximalen Graustufenwertes der selektierten Fläche multipliziert mit 100. Um den Anteil des Knochens, der für die Durchblutung genutzt wird, zu berechnen, wurde ebenfalls ein Quotient gebildet. Der mit *ImageJ* ermittelte Wert der prozentualen Fläche der Havers-Kanäle innerhalb des  $1\text{mm}^2$  wurde dividiert durch den Wert der prozentualen Fläche des Knochens. Insgesamt wurden demnach vier Variablen zur Beschreibung der Haverskanaldichte innerhalb des Caputs, der Foramenregion und der Basis verwendet. Mit dem Kolmogorow-Smirnow- und Shapiro-Wilk-Test wurden die Messwerte auf eine Normalverteilung überprüft. Eine deskriptive Statistik erfolgte ebenfalls. Um die Unterschiede zwischen den Bereichen Caput, Foramen und Basis nachzuweisen, folgte eine Prüfung mit dem Kruskal-Wallis-Test. Die anschließende Post-hoc-Testung zur Identifikation von Gruppenunterschieden erfolgte mittels Dunn-Bonferroni-Test.

Um zu erkennen, wie groß der potenziell nachgewiesene Effekt ist, wurde die Effektstärke  $r$  nach Cohen [53] berechnet:

$$r = \left( \frac{z}{\sqrt{n}} \right) \quad (2.1)$$

Die Gruppengröße  $n$  ist dabei 180, zusammengesetzt aus den zu vergleichenden Gruppen (z. B. Caput & Foramen) mit jeweils 90 Proben. Die Standardteststatistik  $z$  ist bei den paarweisen Vergleichen jeweils abzulesen. Nach Cohen sind die Effektgrenzen beschrieben (siehe Tab. 2.5). Der Kruskal-Wallis-Test als non-parametrischer Test wurde gewählt, da die Daten nicht durchweg normalverteilt sind und mehr als zwei Gruppen (Caput, Foramen, Basis) verglichen wurden.

Zudem handelt es sich um eine unabhängige Stichprobe. Die jeweilige abhängige Variable (z. B. Anzahl der Havers-Kanäle) ist dabei intervallskaliert. Die Nullhypothese ( $H_0$ ) beschreibt, dass kein Unterschied in der Anzahl und Fläche der Havers-Kanäle zwischen den Gruppen Caput, Foramen und Basis besteht. Die Alternativhypothese ( $H_1$ ) besagt, dass ein Unterschied in der Anzahl und Fläche der Havers-Kanäle zwischen den Gruppen Caput, Foramen und Basis besteht. Ergebnisse mit  $p < 0.05$  wurden als signifikant erachtet.

## KAPITEL 3

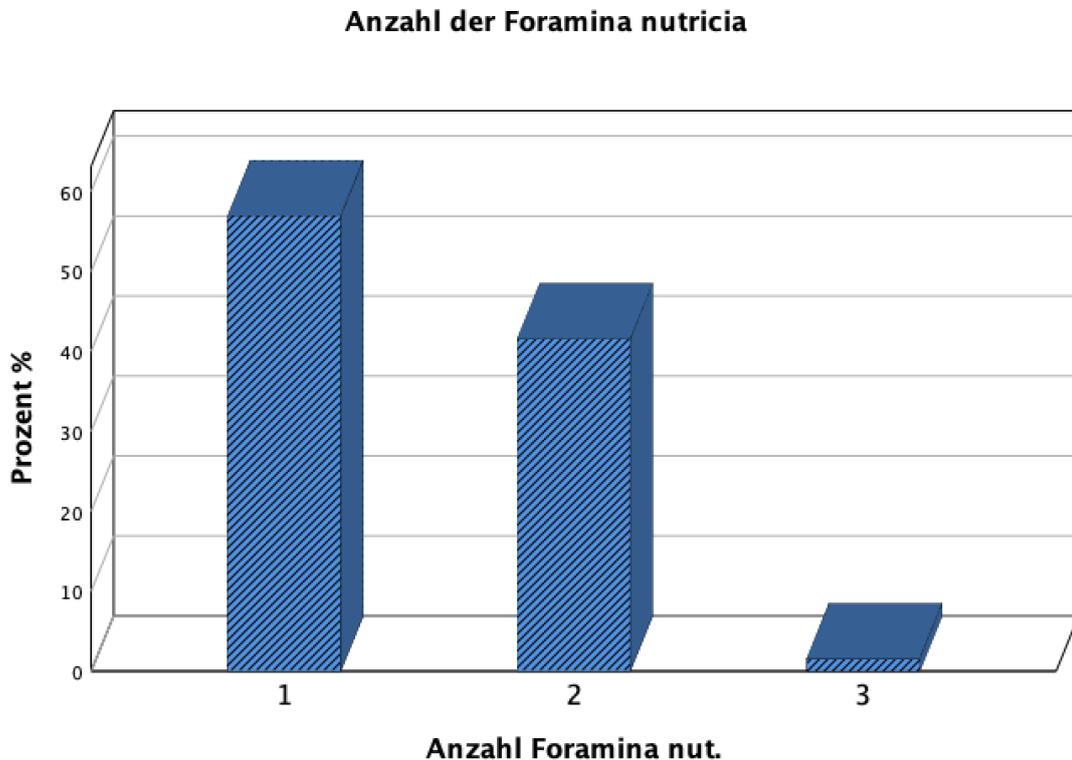
# Auswertung und Ergebnisse

### 3.1 *Charakteristika des Os metatarsale I*

#### 3.1.1 Lokalisation Foramen nutricium

Die Anzahl der Foramina nutricia innerhalb des Os metatarsale I variiert zwischen eins und drei. Von 66 Proben konnte für 65 dieser (Ausschluss eines voroperierten Fußes) festgestellt werden, dass ca. 57 % der Ossa metatarsalia I (exakte gültige Prozente 56,9 %) nur ein Foramen nutricium aufweisen. Folglich weisen 37 der 65 Ossa metatarsalia ein Foramen nutricium auf und spiegeln damit die am häufigsten vorkommende Gegebenheit der Anatomie in dieser Stichprobe wider. In 41,5 % der Fälle lassen sich zwei Foramina an unterschiedlichen Regionen des Knochens nachweisen (siehe Abb. 3.1). Dies entspricht 27 Knochen innerhalb dieser Arbeit. Das Vorkommen von drei FN lässt sich kaum beobachten (1,5 %) und spielt in der weiteren Auswertung eine untergeordnete Rolle. Eine Regelmäßigkeit bzw. signifikante Merkmale des Knochens, die eine Voraussage der Anzahl der Foramina ermöglichen würden, konnten nicht festgestellt werden.

In dieser Arbeit wird, entsprechend der Anzahl der Foramina nutricia, von einem Hauptgefäß sowie einem Nebengefäß gesprochen. Dies gründet sich zum einen darauf, dass ein standardisierter Ablauf der Präparation erfolgte. Das Foramen nutricium des Hauptgefäßes entspricht in den meisten Fällen dem Foramen an der lateralen Region des Knochens, welches als Erstes bei der Präparation identifiziert werden konnte. Des Weiteren ist das Foramen des Hauptgefäßes prominenter und größer, als das Foramen des Nebengefäßes. Die Auswertung erfolgte für die Situation eines Hauptgefäßes mit gleichzeitig vorliegendem Nebengefäß. Die Lokalisation des Nebengefäßes wurde einzeln betrachtet sowie die Fälle, in denen nur ein Hauptgefäß besteht. Dabei kann für die Anterior-posterior-Lokalisation (siehe Abb. 3.2) des Hauptgefäßes festgehalten werden, dass es am häufigsten im Schaftbereich (Region 2) zu finden ist. Genauer ist das Hauptgefäß in 60 % der Proben (entsprechend 39 von 65 Knochen) im Schaftbereich der vertikalen Einteilung des Knochens nachzuweisen. Bei 22 Knochen (33,8 %) ist das Foramen des Hauptgefäßes im distalen

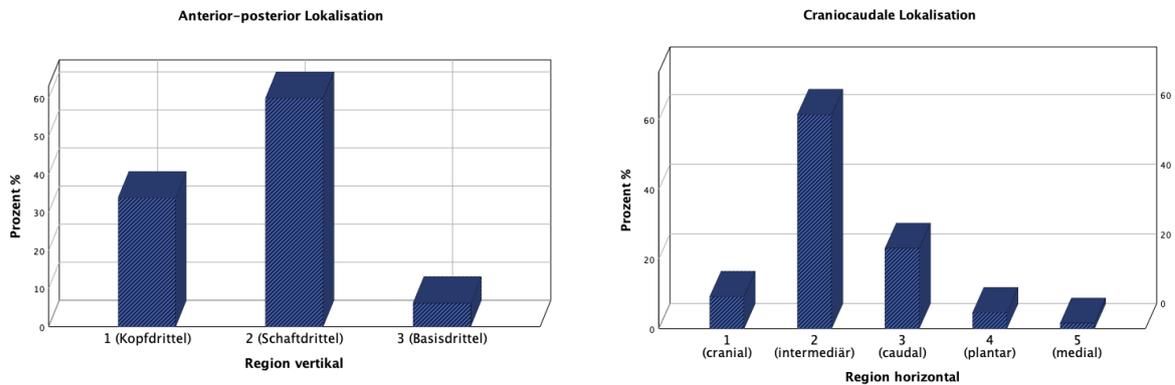


**Abbildung 3.1:** Anzahl der Foramina nutricia am Os metatarsale I.

Kopf-Drittel vorhanden. Basisnah, im proximalen Drittel des Knochens, lässt sich das Foramen nur in 4 Proben nachweisen (6,2%).

Auf der horizontalen Achse lässt sich für die Lokalisation ebenfalls eine deutliche Tendenz festhalten. Zu 61,5% befindet sich das Foramen nutricium des Hauptgefäßes in der intermediären Zone (Region 2). Bei 40 der 65 Knochen tritt damit die A. nutricia (Hauptgefäß) konstant mittig in die laterale Fläche des Os metatarsale I ein. In 15 Knochen (23,1%) lässt sich die Lokalisation des Foramens des Hauptgefäßes weiter caudal (Region 3) in Richtung des plantaren Anteils des M. interosseus plantaris beschreiben. Ein cranialer Eintritt der A. nutricia in den Knochen, mit räumlicher Nähe zur A. metatarsalis dorsalis, lässt sich nur in 9,2% der Proben erkennen. Das Auftreten eines plantaren Hauptgefäßes kann ähnlich wie ein medialer Eintritt weitestgehend vernachlässigt werden (siehe Abb. 3.2). Bei drei Knochen befindet sich unterhalb der Flexoren der Großzehe ein plantares Hauptgefäß, was nur 4,6% der Stichprobe entspricht. Der mediale Eintritt der A. nutricia in den Knochen kommt nur ein einziges Mal vor.

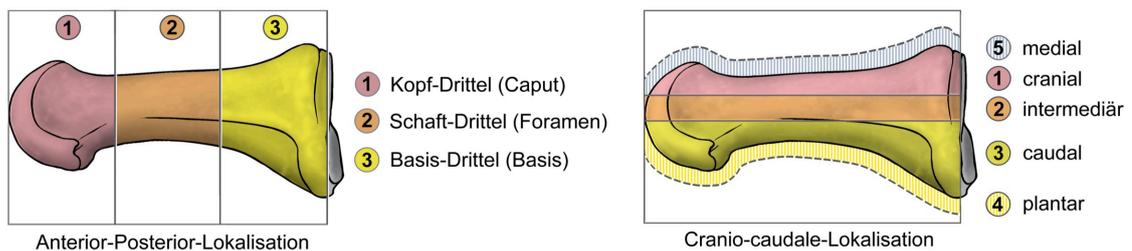
Die horizontale und vertikale Ebene wurden zusammengefasst und folglich 15 mögliche Kom-



**Abbildung 3.2:** Lokalisation Hauptgefäß in der Ap- und Ccp-Lokalisation.

binationen der Lokalisation beziffert. Von diesen wurden in der statistischen Auswertung bereits sechs mögliche Varianten ausgeschlossen, da sie in der Stichprobe nicht auftreten. Im Detail bedeutet dies, dass das Foramen nutricium an folgenden Punkten nicht lokalisiert ist (s. Tab. 3.1).

Das FN des Hauptgefäßes befindet sich am häufigsten in der intermediären Schaftregion an der lateralen Fläche des Os metatarsale I (s. Abb. 3.4 & 3.10). Damit tritt das Hauptgefäß unterhalb des M. interosseus plantaris zentral in den Knochen ein. In 41,5% der Proben lässt sich diese Lokalisation, zusammengesetzt aus beiden Regionen mit der Ziffer 2, nachweisen. Die restlichen Proben weisen ein deutlich divergentes Bild an Kombinationen auf und zeigen keine gleichartig hohe Häufigkeit einer der möglichen Lokalisationen. Die mit 15,4% am zweithäufigsten vorkommende Lokalisation ist das intermediäre Kopfdrittel mit Nähe zur Gelenkkapsel des

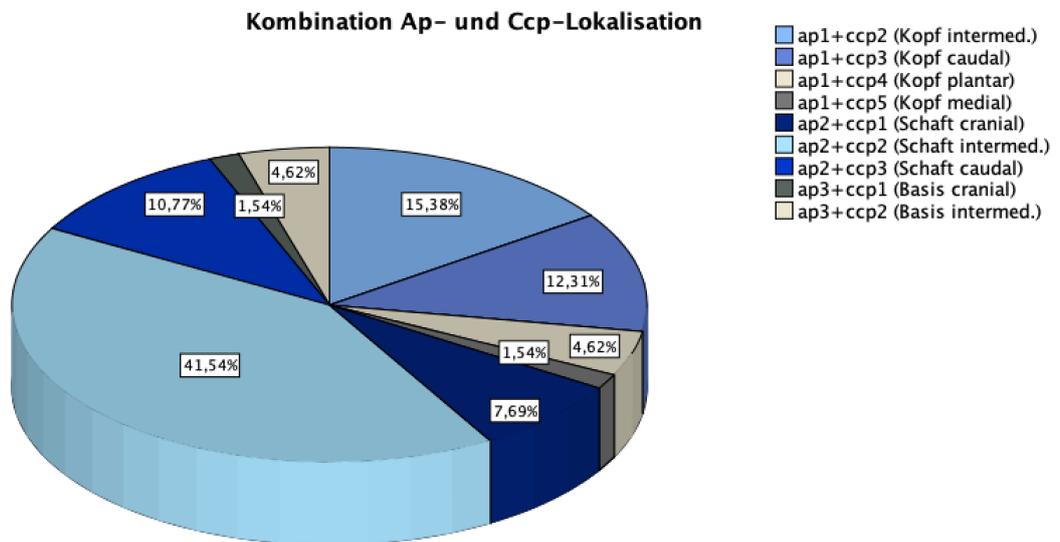


Gezeichnet von Frau C. Opfermann-Rüngeler

**Abbildung 3.3:** Definierten Regionen des Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler.)

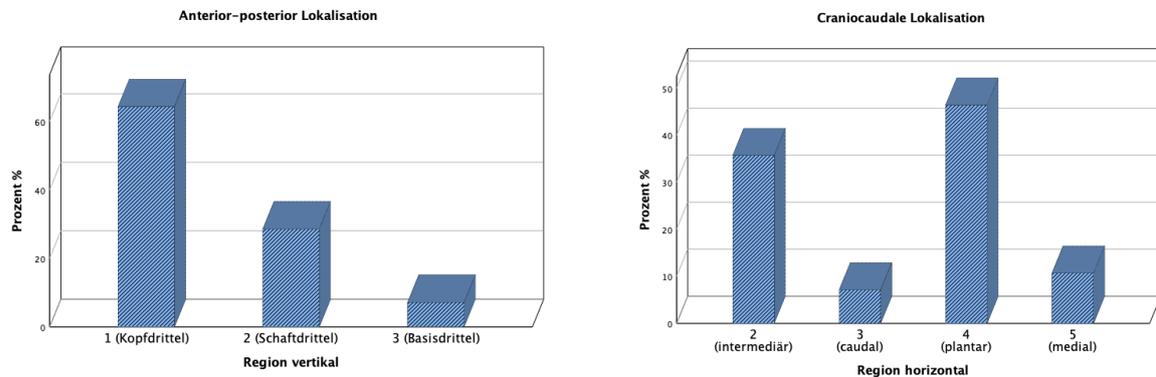
ccp (1-5)	ap (1-3)	Kombination	Lokalisation
1	1	1	craniales Kopfdrittel
4	2	9	plantares Schaftdrittel
5	2	10	mediales Schaftdrittel
3	3	13	caudales Basisdrittel
4	3	14	plantares Basisdrittel
5	3	15	mediales Basisdrittel

**Tabelle 3.1:** Ausgeschlossene Kombinationen des Hauptgefäßes.



**Abbildung 3.4:** Lokalisation des Hauptgefäßes bei Kombination beider Ebenen.

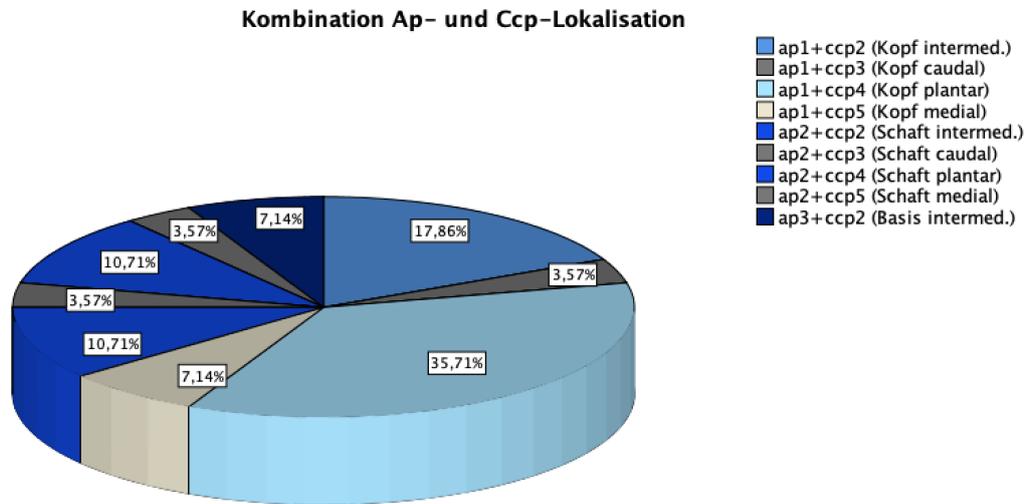
Großzehengrundgelenkes. Dies entspricht 10 der 65 untersuchten Knochen. Auch die dritthäufigste Lokalisation des Hauptgefäßes, mit 12,3% der Proben, befindet sich am Caput des Os metatarsale I, jedoch weiter caudal. Bei sieben der 65 Knochen ist das Foramen nutricium vom Hauptgefäß an der caudalen und bei fünf weiteren an der cranialen Schaftregion nachzuweisen. Bei den restlichen 8 Proben ist der Eintritt des Hauptgefäßes in der plantaren (4,6%) und medialen (1,5%) Caputregion sowie im intermediären (4,6%) und cranialen (1,5%) Basisdrittel des Os metatarsale I darzustellen.



**Abbildung 3.5:** Lokalisation des Nebengefäßes am Os metatarsale I.

Wie im vorherigen Absatz beschrieben, weisen 27 der 65 Ossa metatarsalia neben dem Hauptgefäß ein weiteres Gefäß auf, welches hier als Nebengefäß bezeichnet wird. Das FN des Nebengefäßes wurde im Verlauf der Präparation an verschiedenen Regionen des Knochens gefunden und oftmals erst nach manueller Reinigung sichtbar. Dessen Lokalisation unterscheidet sich in den meisten Proben deutlich von der des Foramens, durch das das Hauptgefäß eintritt. Auch hier lässt sich eine deutliche Tendenz feststellen. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse schließen die eine Probe mit drei vorhandenen Foramina mit ein, sodass sich insgesamt eine Zahl von 28 Knochen mit mindestens zwei Foramina nutricia ergibt. In der vertikalen anterior-posterior Ebene (s. Abb. 3.5) befindet sich das Nebengefäß in 64,3 % der 28 Proben im vorderen Kopfdrittel. Im Gegensatz zur Lokalisation des Hauptgefäßes befindet sich dieses nur in 8 Knochen an der Schaftregion (28,6 %). Am hinteren Basisdrittel zeigt sich das Nebengefäß nur in 7,1 % der Fälle. In der horizontalen Ebene (Ccp-Lokalisation) bestehen zwei Lokalisationen mit ähnlicher Häufigkeitsverteilung. 46,4 % der Foramina vom Nebengefäß befinden sich auf der plantaren Seite des Os metatarsale I, 35,7 % lassen sich in der intermediären Zone verorten (s. Abb. 3.5 & 3.10). Interessanterweise ist bei dem Nebengefäß ein Auftreten an der medialen Seite des Knochens in drei Proben feststellbar.

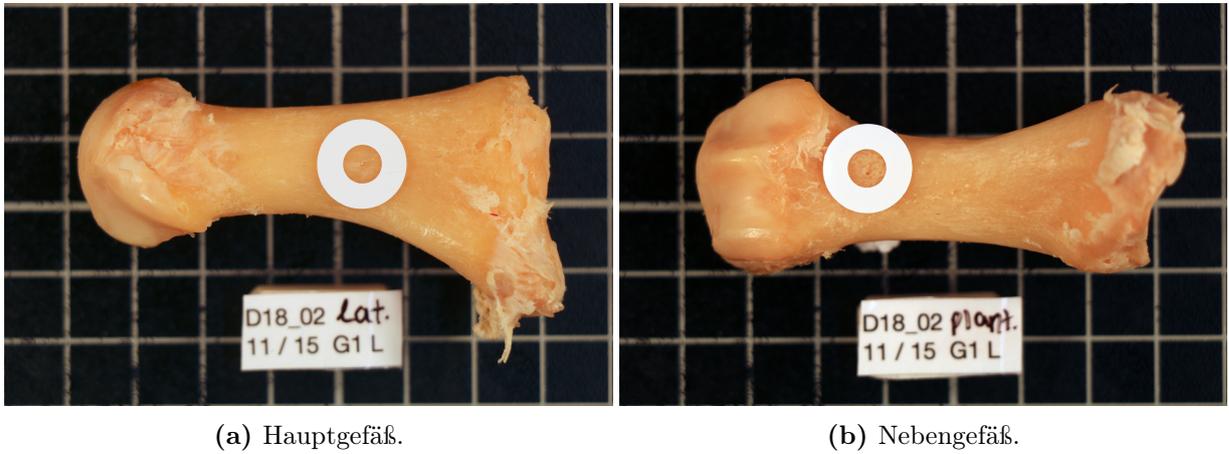
Werden nun beide Ebenen zusammen betrachtet, zeigt sich ebenfalls ein vermehrtes Auftreten des Nebengefäßes in einer Region. In 10 von 28 Ossa metatarsalia tritt das Nebengefäß im vorderen Kopfdrittel plantar und nah der Gelenkkapsel in das erste Os metatarsale ein. Dies entspricht 35,7 % der untersuchten Proben und ist damit die am häufigsten auftretende Lokalisation (s. Abb. 3.6). In 17,9 % der Fälle befindet sich das Foramen des Nebengefäßes ebenfalls im Kopfdrittel, jedoch auf der intermediären Ebene. Die restlichen 12 beschriebenen Foramina sind inhomogen auf die Regionen verteilt und zeigen keine Regelmäßigkeit. Zusammenfassend lässt



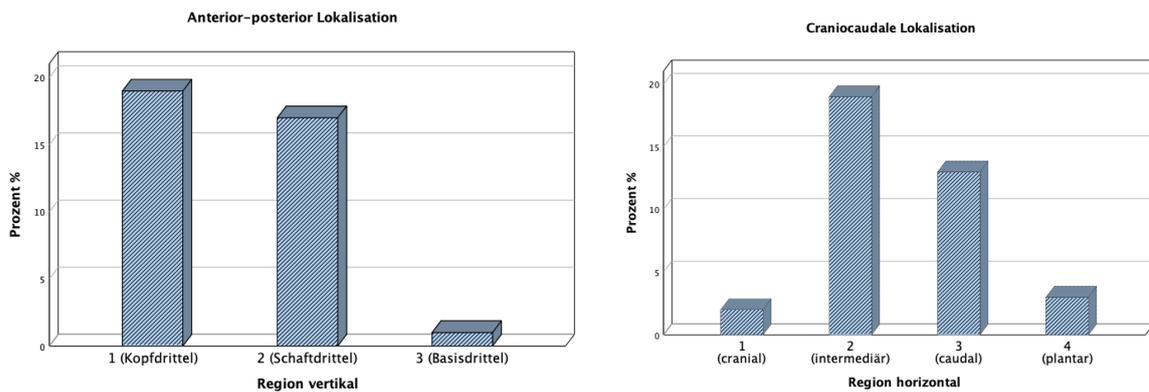
**Abbildung 3.6:** Lokalisation Nebengefäß bei Kombination beider Ebenen.

sich für die grobe Beschreibung der Lokalisation festhalten, dass das Foramen des Hauptgefäßes sich am häufigsten zentral (intermediär) am Schaft befindet. In 28 Proben lassen sich mehr als ein Gefäß beschreiben, welches sich dann in den meisten Fällen im vorderen Kopfdrittel an der plantaren Seite des Os metatarsale I befindet. Die Abbildung 3.7 zeigt dies an einer Probe beispielhaft.

Bei 37 Knochen (56 % der gesamten Stichprobe) liegt kein Nebengefäß vor. Das Hauptgefäß tritt dann am häufigsten im Bereich des Caputs (Region 1) oder im Bereich des Schaftes ein (Region 2). In etwa der Hälfte der Fälle (51,4 %, 19 Knochen) tritt das Hauptgefäß in das distale Kopfdrittel ein. Mit einer ähnlichen Häufigkeit befindet sich das Foramen des Hauptgefäßes im Schaftbereich (45,9 %, 17 Knochen). Ähnlich wie in den bereits beschriebenen Situationen, tritt das Hauptgefäß ohne gleichzeitig vorhandenes Nebengefäß selten in die Basis ein (1 Knochen, 2,7 %). In der horizontalen Ebene tritt das Hauptgefäß, das nicht von einem Nebengefäß begleitet wird, am häufigsten (51,4 % der Fälle) in der intermediären Zone in den Knochen ein. Bei 13 Knochen ist das Foramen des Hauptgefäßes im caudalen Bereich des Os metatarsale I zu finden (35,1 %). Ein plantarer Eintritt ist, ähnlich zum cranialen Eintritt (2 Knochen, 5,4 %), eher die Ausnahme (3 Knochen, 8,1 %).

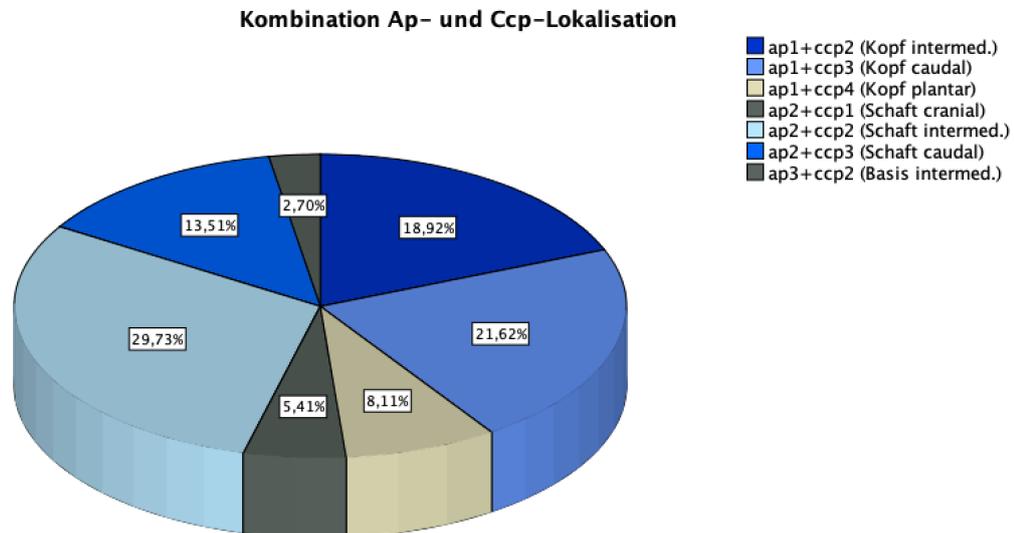


**Abbildung 3.7:** Häufigste Lokalisation der Foramina nutricia beispielhaft an einer Probe. Ansicht von lateral (links) und plantar (rechts).



**Abbildung 3.8:** Lokalisation des Hauptgefäßes ohne Nebengefäß in Ap- und Ccp-Lokalisation.

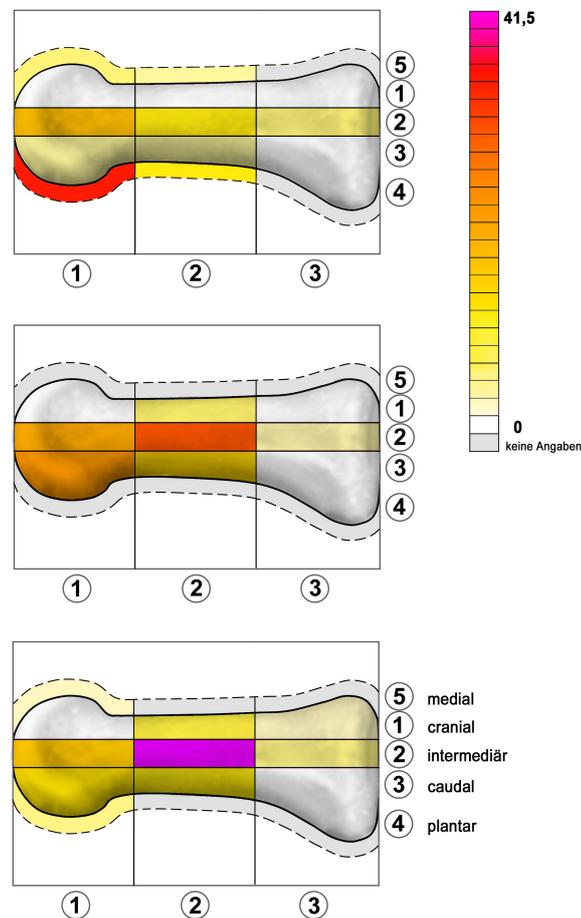
Betrachtet man die vertikale und horizontale Ebene gemeinsam, wird deutlich, dass das Hauptgefäß (im Zustand ohne Nebengefäß) ebenfalls am häufigsten im Bereich des intermediären Schafts eintritt (29,73 %, 11 Knochen). Am zweithäufigsten, mit 21,6 %, befindet sich das Foramen nutricium des Hauptgefäßes am caudalen Kopfdrittel. Ebenfalls am Caput treten 18,9 % der Proben intermediär in das Os metatarsale ein. Am caudalen Schaft lassen sich 5 Foramina nutricia des Hauptgefäßes nachweisen. Der Eintritt des Hauptgefäßes der restlichen 6 Knochen ist am plantaren Caputbereich (8,1 %), am cranialen Schaftbereich (5,4 %) sowie an der intermediären Basis (2,7 %).



**Abbildung 3.9:** Lokalisation Hauptgefäß ohne Nebengefäß bei Kombination beider Ebenen.

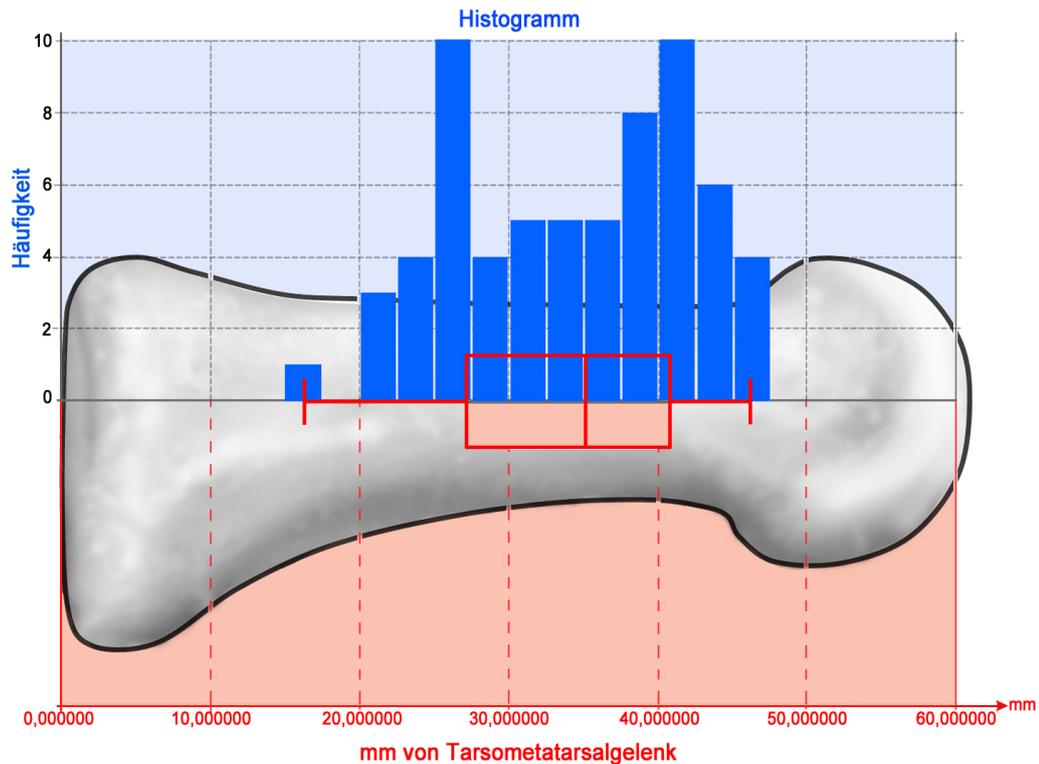
### 3.1.2 Zonen unter Risiko

Um intraoperativ bei einer Hallux-valgus-Operation schnell und mühelos die Lokalisation des Foramen nutricium abschätzen zu können, wurden Zonen in Zentimeter, betrachtet von den Gelenken des Os metatarsale I aus, definiert. Diese charakterisieren den Bereich, in dem ein hohes Risiko besteht das Foramen bei der Osteotomie zu treffen. Zugleich lassen sich damit Bereiche des Knochens definieren, in denen das Foramen nicht getroffen werden kann. Wie in Kapitel 2.9.1 beschrieben, wurde dazu ein theoretischer Standardknochen festgelegt und auf diesen die gemessenen Werte bezogen. Die Länge des Standardknochens ergibt sich aus dem Mittelwert ( $M$ ) aller gemessenen 65 Knochenlängen ( $n=65$ ). Der Mittelwert der Knochenlänge beträgt 66,804 mm ( $M = 6,6804$  cm,  $SD = 4,113967$ ). Die Länge des kürzesten Knochens beträgt 59,273 mm. Der längste Knochen in dieser Stichprobe ist 78,666 mm lang. Anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests sowie Shapiro-Wilk-Tests kann eine Normalverteilung nicht angenommen werden, da der  $p$ -Wert  $< 0,05$  beträgt und die Nullhypothese damit verworfen wird. Auf den Standardknochen von 66,804 mm angepasste Messungen ergeben vom Metatarsophalangealgelenk aus einen durchschnittlichen Abstand von 32,308 mm zum Foramen nutricium des Hauptgefäßes ( $M = 32,3082$ ,  $SD = 7,4114$ ). Der geringste Abstand vom Metatarsophalangealgelenk zum Foramen



**Abbildung 3.10:** Heatmap der Lokalisation des Foramen nutricium; oben: Nebengefäß, Mitte: Hauptgefäß ohne Nebengefäß, unten: nur Hauptgefäß (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler).

beträgt ca. 21 mm (20,9133 mm), der weiteste Abstand 50,2289 mm. Das distale Drittel (exakt 31,30 % ermittelt mit einem Dreisatz) des Os metatarsale I gilt somit als sichere Zone, in dem das Foramen nutricium nicht getroffen werden kann. Im Bereich zwischen 20,9133 mm und 50,2289 mm besteht ein Risiko das Foramen nut. bei einer Osteotomie zu treffen (siehe Abb. 3.11). Im gleichen Sinne vom Tarsometatarsalgelenk aus gemessen, ergeben sich folgende Werte: Das Foramen nutricium wird in einem durchschnittlichen Abstand von 34,39036 mm ( $M$ ) vom Tarsometatarsalgelenk aus nachgewiesen ( $SD= 7,6547$ ). Der geringste Abstand beträgt 16,3184 mm, der größte Abstand zum Foramen 46,1965 mm. Nach der Rechnung mit einem einfachen Dreisatz lässt sich festhalten, dass in das proximale Viertel des Os metatarsale I das Hauptgefäß

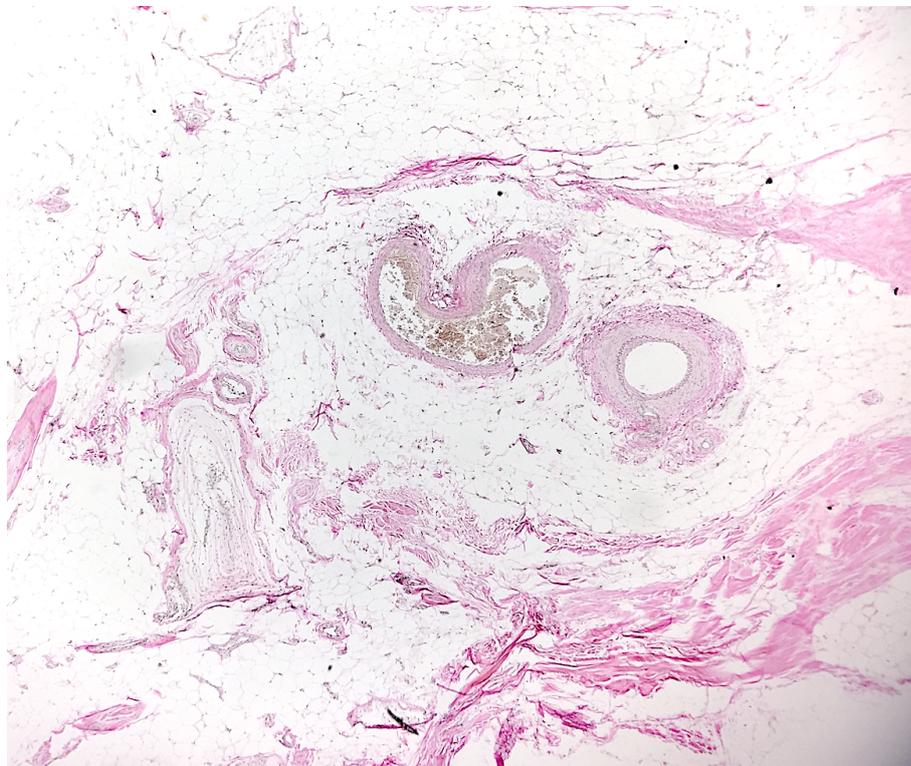


**Abbildung 3.11:** Häufigkeitsverteilung des Foramen nutricium innerhalb high-risk-Region (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler).

nicht eintritt und somit hier keine Gefahr der Beschädigung bei einer Osteotomie besteht.

### 3.2 Die Arteria nutricia

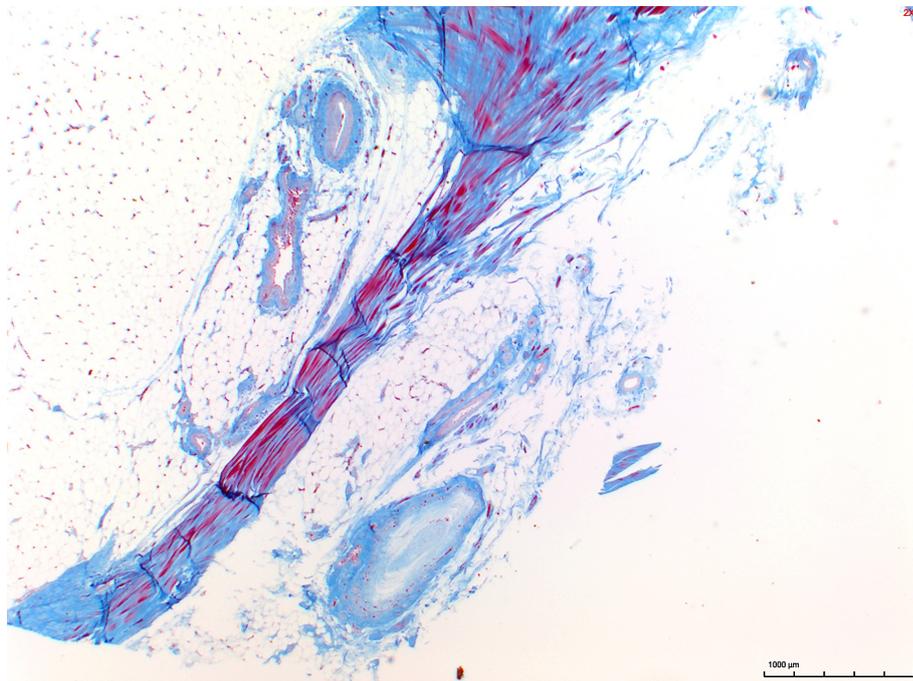
Bei der Präparation der 65 Körperspender konnten nicht alle Arteriae nutriciae dargestellt und entnommen werden. Von den entnommenen 61 Proben waren acht, durch zu wenig vorhandenes Material, nicht auswertbar. Insgesamt konnten 53 histologische Proben der A. nutricia in die Statistik eingeschlossen werden. In den histologischen Präparaten konnte neben der A. nutricia in 98,1% der Fälle eine begleitende Vene präpariert werden. In nur einer Probe war die Existenz einer Vene nicht nachweisbar. Die begleitende Vene befindet sich dabei, im Sinne einer arteriovenösen Kopplung, unmittelbar neben der A. nutricia (siehe Abb. 3.12). Äquivalent hierzu liegt um die A. nutricia und der begleitenden Vene eine Bindegewebsscheide, die sich zirkulär



**Abbildung 3.12:** Gefäßprobe in Elastika-van-Gieson-Färbung. Zentral erkennbare Arteria nutricia mit Färbung der Membrana elastica interna und begleitende Vene umgeben von einer Bindegewebsscheide. Links erkennbares Vater-Pacini-Körperchen (Quelle: eigene Darstellung).

um die Strukturen legt. Sowohl in der Azan- als auch in der Elastika-van-Gieson-Färbung lässt sich erkennen, dass diese sich aus mehreren einzelnen kollagenen Fasern zusammensetzt. Die Präparation erfolgte bei den Proben im Querschnitt, wodurch in den histologischen Präparaten deutlich wird, dass die Fasern der Bindegewebsscheide wellig übereinander liegen. Elastische Fasern innerhalb dieser Bindegewebsscheide lassen sich nicht nachweisen. Von innen liegen dicht im Verbund univakuäre Adipozyten den Bindegewebsfasern an. In und auch außerhalb der Bindegewebsscheide befindet sich in 98,1 % der Präparate ein begleitender Nerv bzw. mehrere kleinere Nervenfasern. Diese können mit an der A. nutricia verlaufen oder sich außerhalb der Bindegewebsscheide befinden. Anschnitte der umliegenden interossären Muskulatur hingegen sind in keinem histologischen Präparat nachweisbar.

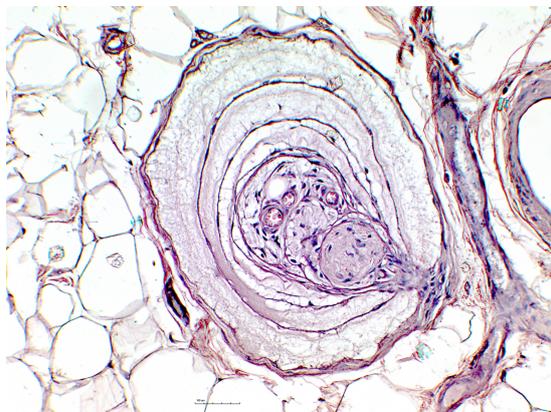
Unerwartet existieren in 40 % der Proben Sinnesrezeptoren in Form von Vater-pacini-Körperchen sowie Golgi-Mazzoni-Körperchen nah der Arteria nutricia. Dabei befinden sich diese zu 95 % außerhalb der zuvor beschriebenen Bindegewebsscheide (siehe Abb. 3.13). Am häufigsten



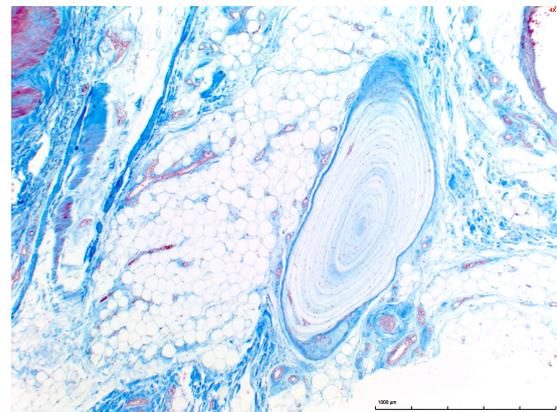
**Abbildung 3.13:** Gefäßprobe in Azan-Färbung. Links im Präparat Arteria nutrita und begleitende Vene sowie kleinere Gefäße und periphere Nerven erkennbar. Außerhalb der Bindegewebskapsel Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens am unteren Bildrand (Quelle: eigene Darstellung).

lässt sich ein einzelnes Vater-Pacini-Körperchen pro Probe nachweisen (24,5%). In 8 der 21 Proben existieren jedoch zwei oder mehr Vater-Pacini- oder Golgi-Mazzoni-Körperchen. Bei 19 der insgesamt 21 vorhandenen VPK ist auch der zugehörige sensorische Nerv nachweisbar (siehe Abb. 3.14a). Außerdem verfügen die VPK in allen Präparaten über eine umliegende Bindegewebskapsel.

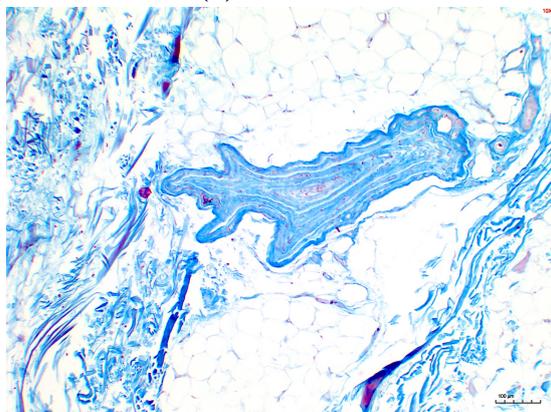
Darüber hinaus existieren neben den identifizierten Propriozeptoren weitere lamellenartige Strukturen, die im Folgenden der Einfachheit halber als „Lamellenkörperchen“ bezeichnet werden (s. Abb. 3.14c). Diese lassen sich in 45,3% der Proben nachweisen und bieten ein uneinheitliches Bild an Form, Größe und Anzahl. Ihnen gemein sind erkennbare und dünn aufeinanderliegende, bindegewebige Lamellen, die sich zu einem Gebilde zusammenschließen. In neun Proben sind zugleich zwei dieser Lamellenkörperchen zu finden. Sie liegen in Analogie zu den Vater-Pacini- bzw. Golgi-Mazzoni-Körperchen oftmals in Gruppen nebeneinander und ebenfalls außerhalb der Bindegewebskapsel (91,7%). Auch verfügen sie in 91,7% der Fälle über eine Art bindegewebige Hülle.



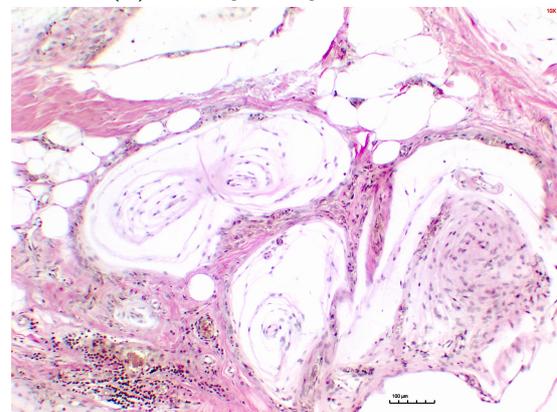
(a) Nerv des VPK.



(b) Bindegewebige Hülle des VPK.



(c) Lamellenkörperchen.

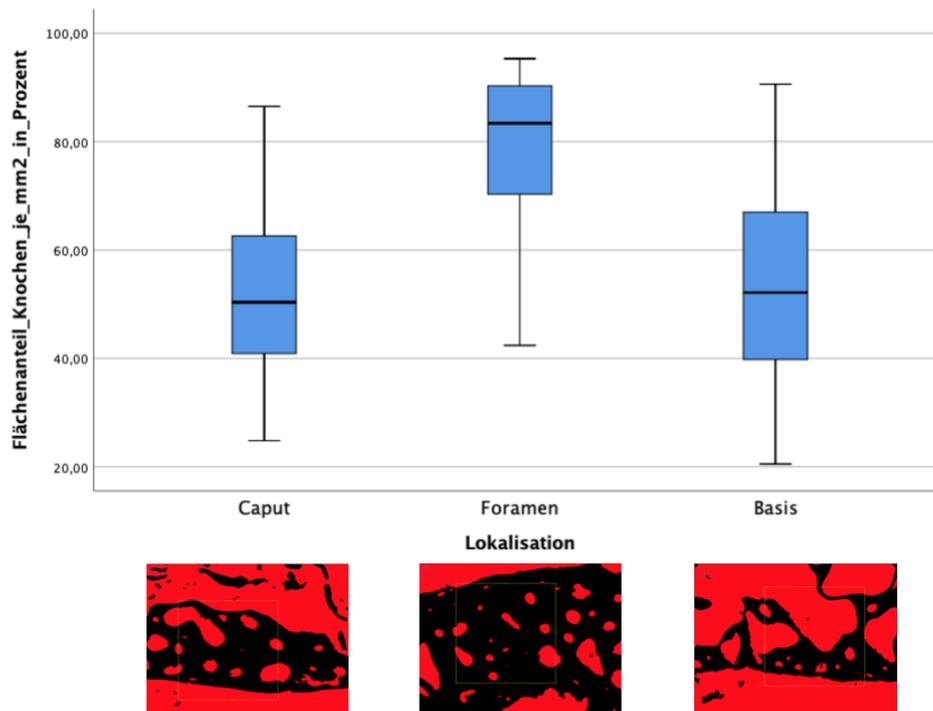


(d) Golgi-Mazzoni-Körperchen.

**Abbildung 3.14:** Darstellung verschiedener Propriozeptoren am Os metatarsale I in Azan-, HE- und Elastika-van-Gieson-Färbung (Quelle: eigene Darstellung).

### 3.3 Lamellen- und Geflechtknochen

Während der Durchsicht aller 270 histologisch angefertigten Präparate wurde der visuelle Eindruck gewonnen, dass die Knochenstruktur sich über die Regionen des Os metatarsale I nicht gleicht. Ein Bestandteil der statistischen Auswertung bestand daher in der Messung des prozentualen Anteils an Knochengewebe innerhalb eines Quadratmillimeters. Unabhängig vom Abschnitt des Metatarsalknochens (Caput, Foramen, Basis) beträgt der Anteil von Knochengewebe im Bereich von einem Quadratmillimeter durchschnittlich 62 % ( $M = 61,693$ ,  $SD = 19,369$ ). Betrachtet über alle Proben ist der maximale Anteil des Knochens innerhalb eines  $\text{mm}^2$  95,3 %. Der geringste prozentuale Wert des Knochenanteils in einem Quadratmillimeter liegt bei 20,5 %. Der Anteil des Knochengewebes im Bereich des Caput beträgt im Mittel 52 % des Quadratmillimeters



**Abbildung 3.15:** Knochenanteil in einem Quadratmillimeter.

( $M = 51,099$ ,  $SD = 14,683$ ). Der Maximalwert beträgt in diesem Teil 86,5 %, der Minimalwert 24,80 %. Dort, wo die Arteria nutricia (Hauptgefäß) eintritt, beläuft sich der durchschnittliche Knochenanteil pro  $\text{mm}^2$  auf 80 % ( $M = 79,196$ ,  $SD = 12,558$ ). In diesem Bereich des Metatarsalknochens nimmt das Knochengewebe mindestens 42,4 % der Fläche eines Quadratmillimeters ein. An dieser Stelle wird der Maximalwert von 95,3 % Knochenfläche in einem Quadratmillimeter erreicht. Die Basis des ersten Mittelfußknochens zeigt im Durchschnitt einen prozentualen Knochenanteil von 54 % ( $M = 53,893$ ,  $SD = 17,150$ ) pro Quadratmillimeter. Maximal 90 % Knochenfläche pro Quadratmillimeter werden im Basisteil erreicht. Die kleinste Knochenfläche im Bereich der Basis nimmt 20 % des gemessenen Quadratmillimeters ein (s. Abb. 3.15).

Durch den Kruskal-Wallis-Test kann die Nullhypothese ( $H_0$ ) abgelehnt (Signifikanzniveau .050) und die Alternativhypothese angenommen werden. Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Regionen Caput, Foramen und Basis im prozentualen Knochenanteil ( $p < .001$ ) pro Quadratmillimeter. Anhand von Dunn-Bonferroni-Tests wird deutlich, dass ein signifikanter Unterschied nur zwischen den Paaren Caput-Foramen und Basis-Foramen ( $z = -9,549$ ,  $p < .001$

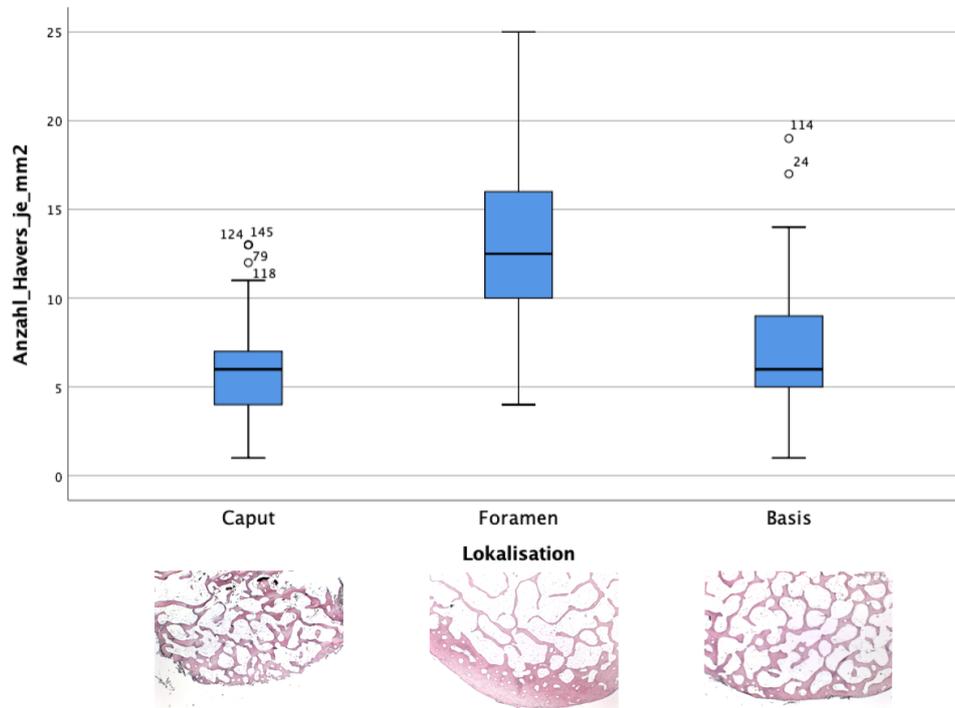
&  $z = 8,715$ ,  $p < .001$ ) besteht. Zwischen Caput und Basis lässt sich, in Bezug auf die Knochenfläche, kein signifikanter Unterschied nachweisen ( $p = 1,000$ ). Die Bedeutung des Unterschiedes wurde mit der Effektstärke nach *Cohen* (s. Kap. 2.9.2) berechnet. Beim Unterschied zwischen Caput und Foramen handelt es sich um einen starken Effekt ( $r = .711$ ). Auch zwischen der Basis und der Foramenregion kann dieser Effekt nachgewiesen werden ( $r = .649$ ).

### 3.4 Architektur der Blutversorgung

#### 3.4.1 Havers-Kanäle

Im Mittel finden sich über alle Regionen (Caput, Foramen, Basis) des Os metatarsale 8 Havers-Kanäle pro Quadratmillimeter ( $M = 8,59$ ,  $SD = 4,906$ ). Maximal sind 25 Havers-Kanäle in einem Quadratmillimeter vorhanden. Ein Havers-Kanal pro  $\text{mm}^2$  stellt die kleinste gemessene Anzahl dar. Differenziert auf drei Regionen Caput, Foramen und der Basis lässt sich folgende Haverskanalverteilung feststellen: Das Caput weist durchschnittlich 6 Kanäle ( $M = 5,78$ ,  $SD = 2,751$ ), die Foramenregion 13 Kanäle ( $M = 13,08$ ,  $SD = 4,626$ ) und die Basis 7 Kanäle ( $M = 6,90$ ,  $SD = 3,541$ ) pro  $\text{mm}^2$  auf (siehe Abb. 3.16). In der Foramenregion sind maximal 25 und mindestens 4 Havers-Kanäle in einem  $\text{mm}^2$  vorzufinden. Im Bereich des Caputs sind hier maximal 13 und mindestens ein Havers-Kanal in einem Quadratmillimeter zu messen. Ebenfalls ist im Bereich der Basis mindestens ein Havers-Kanal vorhanden. Der Höchstwert beträgt hier 19 Havers-Kanäle pro  $\text{mm}^2$ .

Der Kruskal-Wallis-Test zeigt, dass die Nullhypothese ( $H_0$ ) zum Signifikanzniveau .050 abzulehnen ist ( $p < .05$ ). Es besteht ein signifikanter Unterschied ( $p < .001$ ) zwischen den Regionen Caput, Foramen und Basis in der Anzahl der Havers-Kanäle pro Quadratmillimeter. Anschließend durchgeführte Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni-Tests) zeigen, dass sich nur die Regionen Caput und Foramen ( $z = -9,972$ ,  $p < .001$ ) sowie Basis und Foramen ( $z = 8,144$ ,  $p < .001$ ) signifikant unterscheiden. Es handelt sich jeweils um einen starken Effekt nach *Cohen* [53] ( $r = .743$ ,  $r = .607$ ). Werden der Bereich Caput und Basis verglichen, so ist kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Anzahl der Kanäle mehr nachweisbar ( $p = .203$ ). Der Flächenanteil der Kanäle in dem gemessenen Bereich (Quadratmillimeter) wird in Prozent berichtet. Werden alle Präparate betrachtet, beträgt die Fläche der Havers-Kanäle im Mittel 3% in einem Quadratmillimeter ( $M = 3,110$ ,  $SD = 1,883$ ). Der größte Wert beträgt 8,21% Fläche an Havers-Kanälen in einem Quadratmillimeter. Des Weiteren existieren Proben, in denen die Havers-Kanäle weniger als 1% der gemessenen Fläche einnehmen. Im Bereich des Kopfes des Os metatarsale I beträgt die Fläche der Havers-Kanäle in einem Quadratmillimeter durchschnittlich 2,3% ( $M = 2,263$ ,  $SD = 1,423$ ). Der Maximalwert beträgt 6% und der Minimalwert  $<1\%$  in dieser Region. Die Region um das Foramen zeigt Havers-Kanäle, die im Mittel 4,4% der Fläche im gemessenen Bereich



**Abbildung 3.16:** Anzahl der Havers-Kanäle in einem Quadratmillimeter.

einnehmen ( $M = 4,423$ ,  $SD = 1,819$ ). Die größte Fläche der Kanäle beträgt, in den Bereichen um das Foramen, 8,211 % pro Quadratmillimeter. Auch hier liegt die kleinste gemessene Fläche von Haverskanälen unter 1 %. Eine Haverskanalfläche von durchschnittlich 2,6 % im gemessenen Quadratmillimeter lässt sich im Bereich der Basis festhalten ( $M = 2,646$ ,  $SD = 1,641$ ). Die größte Haverskanalfläche ist hier 7,183 %, die kleinste unterhalb 1 % des Quadratmillimeters. Ebenfalls kann hier die Alternativhypothese ( $H_1$ ) angenommen und die Nullhypothese ( $H_0$ ) durch den Kruskal-Wallis-Test abgelehnt werden ( $p < .001$ ). Die Fläche, die durch die Havers-Kanäle eingenommen wird innerhalb des Quadratmillimeters, zeigt signifikante Unterschiede je nach Region des ersten Metatarsalknochens. Durch darauffolgende paarweise Vergleiche (Dunn-Bonferroni-Tests) kann ein signifikanter Unterschied zwischen den Paaren Caput-Foramen ( $z = -7,534$ ,  $p < .001$ ) und Basis-Foramen ( $z = 6,033$ ,  $p < .001$ ) gezeigt werden. Zwischen den Bereichen Caput und Basis kann kein signifikanter Unterschied in der Haverskanalfläche pro  $\text{mm}^2$  nachgewiesen werden ( $p = .400$ ). Mittels der Effektstärke nach *Cohen* lassen sich für Caput und Foramen ein starker Effekt ( $r = .562$ ), für Basis und Foramen nur ein mittlerer Effekt nachweisen ( $r = .441$ ).

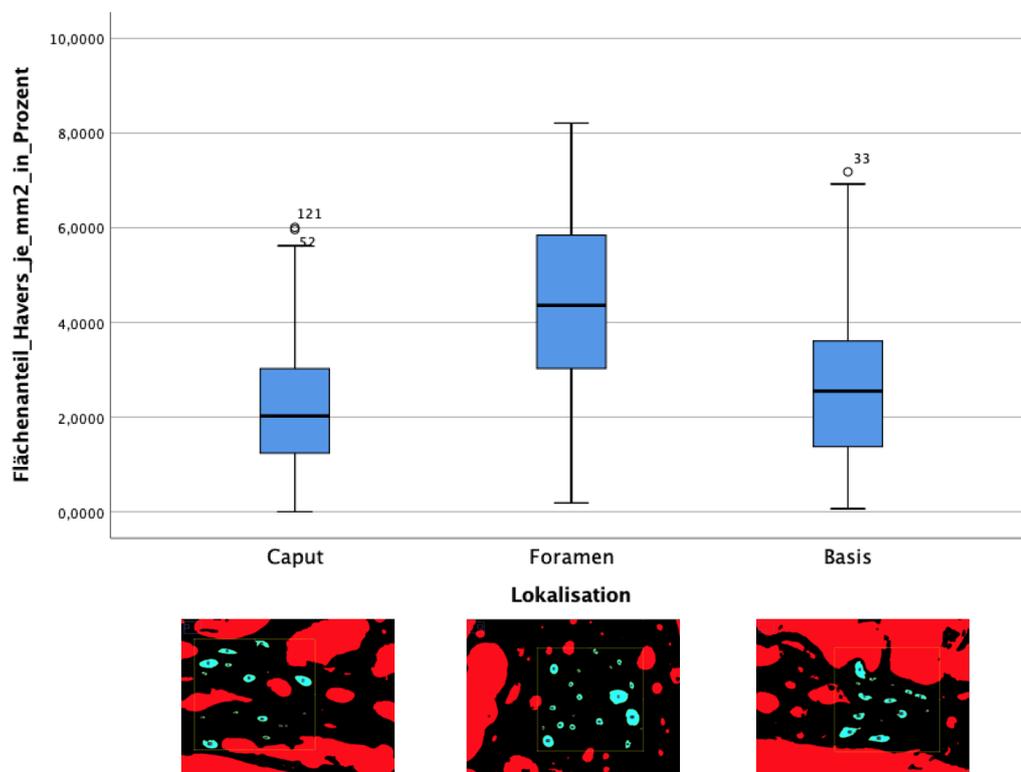
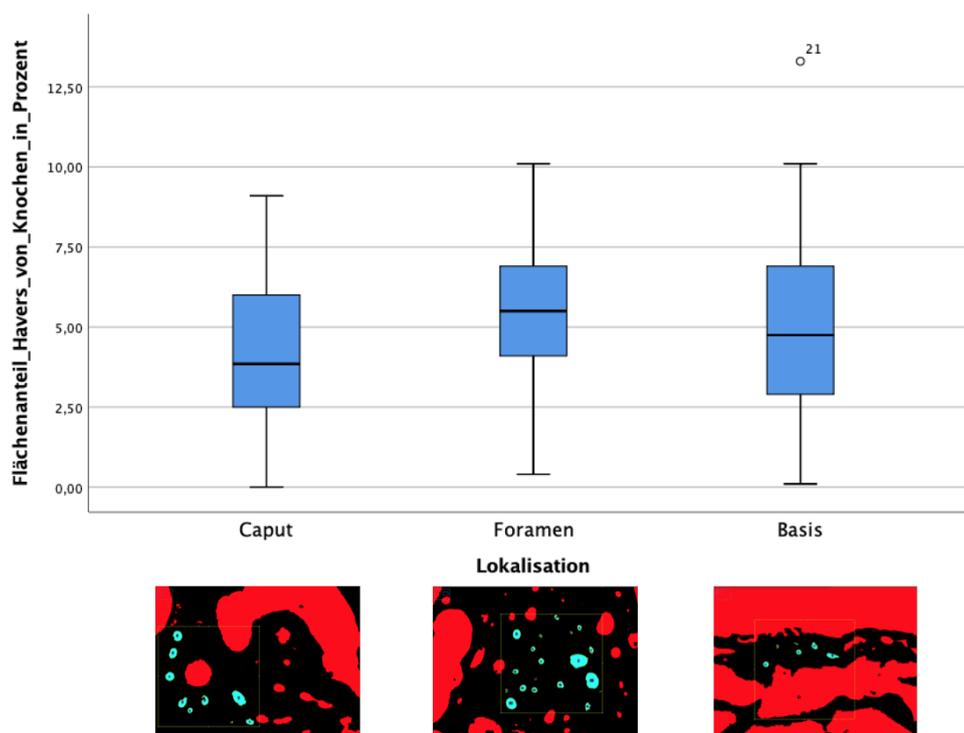


Abbildung 3.17: Haverskanalfläche in einem Quadratmillimeter.

### 3.4.2 Durchblutung

Um Rückschlüsse auf die Blutversorgung ziehen zu können, wurde der prozentuale Anteil der Haverskanalfläche in Bezug auf die jeweils zur Verfügung stehende Knochenfläche gemessen. Den drei Abschnitten des ersten Metatarsalknochens ist gemein, dass knapp 5 % der Knochenfläche für Havers-Kanäle genutzt ( $M=4,838$ ,  $SD=2,330$ ) werden. Über den gesamten Metatarsalknochen gesehen, beträgt die maximale Haverskanalfläche 13,3 % der vorhandenen Knochenfläche. Des Weiteren existieren im Metatarsalknochen Areale, in denen der Knochen keine Havers-Kanäle aufweist. Im Bereich des Caputs werden durchschnittlich 4 % und maximal 9,1 % der Knochenfläche für Havers-Kanäle genutzt ( $M=4,172$ ,  $SD=2,162$ ). Bereiche des Knochens, die keine Havers-Kanäle aufweisen, werden auch im Caput gemessen. An der Stelle des Foramen sind im Mittel 5,5 % der Knochenfläche Havers-Kanäle ( $M=5,488$ ,  $SD=1,978$ ). Maximal nehmen im Bereich um das Foramen 10 % des Knochens Havers-Kanäle ein. Auch hier bestehen Anteile



**Abbildung 3.18:** Haverskanalfläche innerhalb der Knochenfläche eines Quadratmillimeters.

des Knochengewebes, die wenig Havers-Kanäle aufweisen. Die Durchblutung an der Basis ist bestimmt durch im Mittel knapp 5 % Haverskanalfläche im Knochen ( $M = 4,854$ ,  $SD = 2,634$ ). Die größte Fläche an Knochengewebe, die für Havers-Kanäle dient, beträgt 13,3 %.

Anhand des Kruskal-Wallis-Tests kann auch hier die Alternativhypothese ( $H_1$ ) angenommen werden. Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen dem Anteil an Knochengewebe, der für die Durchblutung über Havers-Kanäle genutzt wird ( $p = .001$ ) zwischen den Regionen des Knochens. Die Post-Hoc-Tests zeigen einen signifikanten Unterschied jedoch nur noch zwischen dem Caput und der Foramenregion ( $z = -3,846$ ,  $p < .001$ ). Der Effekt nach *Cohen* ist dabei nur schwach ( $r = .287$ ). Die Regionen Basis und Foramen sowie Caput und Basis zeigen in dem prozentualen Anteil des Knochens, der für die Havers-Kanäle genutzt wird, keinen signifikanten Unterschied nach Dunn-Bonferroni-Test ( $z = 1,987$   $p = 0,141$ ,  $z = -1,859$   $p < .189$ ).

## KAPITEL 4

# Diskussion

### 4.1 Länge des Os metatarsale I

Die allgemeine Länge des Os metatarsale I wird in dieser Arbeit mit durchschnittlich  $66,80 \text{ mm} \pm 4,11 \text{ mm}$  beschrieben. Ein ähnliches Ergebnis von  $65,48 \pm 4,67 \text{ mm}$  publizierten Munuera et al., die die Länge des Os metatarsale I beim Hallux valgus mit dem der gesunden Normalpopulation verglichen. Interessanterweise postulierten sie einen Zusammenhang zwischen Länge des Os metatarsale I und der Pathologie des Hallux valgus. Der erste Mittelfußknochen war in der HV-Gruppe zum einen nach distal verschoben (relative Protrusion), und zum anderen insgesamt länger ( $67,91 \pm 4,41 \text{ mm}$  in der HV-Gruppe) [238]. Vergleichbare Ergebnisse zeigte eine Untersuchung aus dem Jahr 1995, die durch Messungen an Röntgenbildern von HV-Patienten längere erste Mittelfußknochen beschrieb, als in der Normalpopulation [331]. Einen ähnlichen Zusammenhang sehen Coughlin et al. beim juvenilen HV. Sie stellten einen vergrößerten HV-Winkel bei längerem ersten Mittelfußknochen fest [66]. Eine weitere Verbindung in Bezug auf die Hallux-valgus-Deformität wird in der Proportion des ersten zum zweiten Mittelfußknochen gesehen. Demnach formulierten Viladot et al., dass im Vergleich zum zweiten Mittelfußknochen ein zu kurzes Os metatarsale I mit dem Pathomechanismus des HV korreliert [352]. Dem entgegen sprechen die Ergebnisse von Harris et al. [126], die bei Patienten mit HV den gleichen Anteil an kurzen und langen ersten Mittelfußknochen erfassten.

Der Länge des ersten Mittelfußknochens wird durch diese Studien eine einflussnehmende Eigenschaft zugesprochen. Die in dieser Arbeit gemessenen Werte sind stimmig zu den zuvor beschriebenen Längen des ersten Mittelfußknochens. Ob ein zu langer erster Mittelfußknochen eine Pathologie hervorruft, oder ob durch pathologische ossäre Anbauten ein längeres Os metatarsale I gemessen werden kann, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Um diese Frage zu beantworten, ist auch die Messung der ersten Phalanx und seiner Länge vonnöten, da diese Bestandteil des HV-Winkels ist und somit die Pathologie definiert. Einzelstehende Messungen der Knochen ohne diese in Relation zu setzen sind rein deskriptiv. In Hinblick auf die Biomechanik und der

zu wählenden Operationsmethode bei HV (bspw. Wahl einer Operation mit einer *verkürzenden* Wirkung), stellt sich die Frage nach der „*physiologischen*“ Länge des Os metatarsale I spannend dar und könnte Gegenstand weiterer anatomischer Untersuchungen sein.

## 4.2 Die Arteria nutricia

### Lage des Foramen nutriciums

Die generelle Existenz der A. nutricia am Os metatarsale I wurde in der Literatur, unter anderem durch aufwendige Untersuchungen mittels Spalteholz-Technik, mehrfach bestätigt [158, 277, 301]. Äquivalent zu den Ergebnissen dieser Arbeit, zeigten Jones et al. 1995 in allen von ihnen untersuchten Proben eine A. nutricia am Os metatarsale I. Ihr genauer Eintritt, Lage und Richtung des Foramens wurde in der Vergangenheit ebenfalls mehrfach beschrieben. Beleuchtet man zunächst die grobe anatomische Lage des Eintrittes der A. nut., so kann aus den Proben dieser Arbeit ein stets lateraler Eintritt, mit Ausnahme einer Probe, festgestellt werden. Diese Lage des FN am Os metatarsale I wurde auch von Wood et al. 1946 erkannt, die das FN *immer* an der lateralen (fibularen) Seite des Knochens fanden [157, 309]. Eine aktuellere Untersuchung aus dem Jahr 2017 unterstreicht noch einmal den lateralen Eintritt der A. nut. in den ersten Mittelfußknochen [178]. Patake et al. beschrieben das FN zu 86,17 % an der lateralen Seite des Schafts und zu 4,26 % einen medialen Eintritt der A. nut., in den ersten Mittelfußknochen [256]. Der zuletzt genannte mediale Eintritt der A. nut. wird selten bis gar nicht beobachtet [5]. In den Ergebnissen dieser Arbeit kommt ein medialer Eintritt unterstützend bei nur 1,5 % der 65 Vorfüße vor, was der geringsten Gegebenheit entspricht. Hierbei könnte es sich auch um ein akzessorisches Gefäß, z. B. bei einem pathologisch veränderten ersten Strahl, handeln. Da die FN rein makroskopisch mit bloßem Auge untersucht wurden, ist hier eine fehlerhafte Bewertung letztendlich nicht mit Sicherheit auszuschließen, sodass es sich bei dem medial gefundenen Foramen um keine gefäßführende Struktur handeln könnte.

Rath et al. beschrieben ebenfalls einen Eintritt der A. nut. an der lateralen Diaphyse des Os metatarsale I und skizzierten gleichzeitig, dass die A. nut. aus unterschiedlichen Gefäßen entspringt. Mit 36,4 % ist der vaskuläre Hauptursprung der A. nut. aus der ersten A. metatarsalis plantaris. Ihr zweithäufigster Ursprung (31,8 % ) ist die A. plantaris profunda [277]. Der genaue Ursprung der A. nutricia war nicht Gegenstand der Präparation und Untersuchung dieser Arbeit. Die Ergebnisse von Rath et al. unterstreichen jedoch noch einmal zusätzlich, den lateralen Eintritt des ernährenden Gefäßes in den ersten Mittelfußknochen, da die genannten Ursprungsarterien im *lateralen* Weichteilmantel verlaufen. Zieht man zur Beurteilung die vergleichbaren Mittelhandknochen heran, so lässt sich ein stimmiges Bild skizzieren. Das Foramen nutricium des ersten und zweiten Mittelhandknochens befindet sich hauptsächlich an der zum

Interdigitalraum geneigten Fläche des Knochens und entspricht damit dem zuvor betonten lateralen Eintritt in das Os metatarsale I [240]. Diese Regelmäßigkeit wechselt ab dem dritten Mittelhandknochen, sodass sich hier das Foramen an der medialen Knochenfläche befindet. In Bezug auf die restlichen Ossa metatarsalia stellt dies eine interessante Fragestellung dar, die in einer weiteren Arbeit genauer beleuchtet werden müsste.

Monreal-Redondo et al. untersuchten die Foramina am Os metatarsale I im physiologischen Zustand und an Füßen mit Hallux valgus. Dabei stellten sie den Eintritt der A. nutricia ebenfalls an der fibularen (lateralen) Fläche in beiden Gruppen dar. Zugleich bestätigten sie eine konstante, geschlechtsunabhängige Lage des FN des Os metatarsale I. Die Pathologie des Hallux valgus hat erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Lage des FN [232]. Die Autoren fanden in beiden Gruppen hauptsächlich einen plantaren Eintritt der A. nut. in den ersten Mittelfußknochen [232]. Dies können die Ergebnisse dieser Arbeit, mit einem hauptsächlich lateralen Eintritt der A. nutricia in den mittleren (*intermediären*) Schaft, nicht bestätigen. Hierzu unterstützend betitelten Jones et al. den Eintritt der A. nut. grob am Übergang vom mittleren zum proximalen Drittel des Schaftes [158]. Dies deckt sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit, wobei sich die A. nut. dieser Proben eher auf die Region des mittleren (*intermediären*) bis distalen Drittels des Os metatarsale konzentriert. In einer Studie zu dem Eintritt der Arteria nut. in die Ossa metatarsalia und metacarpalia beschrieben Patake und Mysorekar dasselbe Ergebnis [256]. Bei den Spalteholzpräparaten von Shereff et al. perforierte die A. nut. die laterale Kortikalis im distalen Drittel oder an der Schnittstelle des mittleren und distalen Drittels des Os metatarsale I [301]. Den Übergangsbereich vom mittleren zum distalen Drittel sehen auch andere Autoren als Hauptregion des FN-Eintrittes [277, 353]. Tonogai et al. postulierten den Eintritt der A. nut. im distalen Drittel des Os metatarsale I. Die Richtung des Foramens variierte dabei [337].

Die Lokalisation der A. nut. in der Diaphyse des Knochens ist in der Literatur als allgemeine anatomische Gesetzmäßigkeit bei Mensch und Säugetieren beschrieben und lässt sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit gut in Einklang bringen [7, 10, 240, 262, 321]. Folglich gilt auch für den Humerus, als langer Röhrenknochen zum Vergleich, ein Eintritt der A. nut., bezogen auf die Gesamtlänge des Knochens, im mittleren Drittel [49, 171, 196, 245]. Auch an diesem Knochen ist die Lage des Foramens unterschiedlich und es herrscht in der Literatur Uneinigkeit über die genauere Lokalisation. Einige Autoren benannten ein häufigeres Vorkommen des FNs im Bereich des proximalen [49, 245], andere im Bereich der distalen Zone des mittleren Drittels des Humerusschaftes [196].

Insgesamt wird deutlich, dass die A. nut. hauptsächlich in die laterale mittlere Schaftregion des Os metatarsale I eintritt, jedoch auch eine Varianz der Lokalisation vorliegen kann. Der zweithäufigste Eintritt der A. nut. in dieser Arbeit ist im distalen intermediären Caput-Drittel und entspricht damit dem in der Literatur betitelten distalen Drittel. Die genannte Varianz der

Lage wurde in der Vergangenheit bereits im kausalen Zusammenhang thematisiert. An langen Röhrenknochen wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Lokalisation des FN mit den Erfordernissen einer kontinuierlichen Blutversorgung an bestimmten Regionen des Knochens in Zusammenhang steht. Als Beispiel werden Bereiche des Knochens thematisiert, in denen große Muskelansätze vorhanden sind [171]. Gleichmaßen erläuterten Lacroix et al., dass der Zug der Muskulatur am Periost bestimmte anomale Richtungen des Foramen nutriciums erklären könnten [312]. Für das Os metatarsale I kann diese Hypothese eher abgelehnt werden, da die lateral anliegenden Mm. interossei eher weniger beansprucht werden, als die plantar ansetzenden Flexoren oder Adduktoren (M. flexor hallucis brevis, M. adductor hallucis).

### **Anzahl der Foramina nutricia**

Die Tatsache, dass in einigen Proben mehr als ein Foramen nutricium dargestellt werden konnte, deckt sich mit Studien über Foramina an anderen Knochen (Femur: 6, Humerus: 4, Scapula: 5,3, Ulna: 3). Auch zeigte sich hier die Lokalisation dieser zum Teil mit einer hohen Varianz [83, 171, 196, 240, 241, 243, 375]. In Bezug auf das Os metatarsale I beschrieben Anamika et al. im Jahr 2015 ein ähnliches Vorkommen von einem bis drei Foramina nutricia am ersten Mittelfußknochen. Dabei erläuterten sie das hauptsächliche Vorkommen (79,3 %) eines einzelnen Foramens im ersten Mittelfußknochen [5]. Anders entdeckten Anamika et al. in nur 22 % der Fälle die Existenz eines zweiten Foramens, wohingegen in der vorliegenden Untersuchung dieses in fast der Hälfte der Proben aufzufinden war. Dies kann bedingt sein durch die fehlende genaue Definition des Nebengefäßes (siehe Methodenkritik), wodurch eventuell großkalibrige, plantare Äste fälschlicherweise als ernährende Gefäße mitgezählt wurden. Ähnlich hohe Fälle mit mehreren FN, fanden jedoch auch Patake et al., die äquivalent zu den Ergebnissen dieser Arbeit am häufigsten zwei Foramina am ersten Mittelfußknochen vorfanden. Das Vorkommen von zwei oder mehr Foramina nutricia konnte auch für die restlichen Ossa metatarsalia nachgewiesen werden [309].

In den vergleichbaren Mittelhandknochen zeigte eine anatomische Untersuchung eine ähnliche Anzahlverteilung der Foramina. Das Auftreten von einem Foramen ist hier die häufigste, und drei Foramina die seltenste Gegebenheit [256, 274, 308, 310]. Hinsichtlich der Anzahl und Lokalisation bestanden keine erkennbaren Seitenunterschiede zwischen den Ossa metatarsalia, was bereits durch andere Studien gezeigt werden konnte [232, 308, 309]. Auch bei anderen Knochen wurden, in Bezug auf die Anzahl der Foramina, keine Seitenunterschiede beschrieben [369]. Ähnlich zu dieser Arbeit wurde in der Literatur die Unterteilung in ein Haupt- und Nebengefäß bereits von Autoren vorgenommen, die am Humeruskopf zwei oder mehrere Foramina vorfanden. Dabei gingen die Autoren am Humeruskopf von einem Hauptforamen und einem akzessorischen Foramen aus, welche ursprünglich entweder aus der Brachial- oder der Profunda-Brachii-Arterie

entstanden sind [183, 243, 369]. Ähnlich erwähnten Kizilkanat et al. am Humerus zwei Foramina, wobei sie keiner dieser eine Dominanz zuordnen konnten [171]. Eine These zu den mehrzähligen Foramina ist, dass wenn zwei oder mehrere an unterschiedlichen Seiten des Knochens vorliegen, diese einen anderen Gefäßursprung haben [256]. In der Literatur zu langen Röhrenknochen wird zudem beschrieben, dass die Anzahl und die Größe der Foramina nicht mit der Länge des Knochens korreliert [256, 369]. Diese Beobachtung können die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen. So zeigten sich die drei Foramina *nutricia* *nicht* am längsten Mittelfußknochen. Mysorekar et al. konkludierten gegenteilig, dass beim Femur aufgrund seiner Länge von zwei Hauptforamina gesprochen werden sollte [243].

Das Fehlen eines Foramen *nutricium*s am Knochen ist ebenfalls in der Literatur beschrieben und diskutiert worden [202, 243]. Dass auch die Metatarsalknochen kein FN aufweisen können, ist bekannt [5, 178]. Eine Hypothese von Patake et al. dazu besagt, dass die Versorgung bei Fehlen eines Foramen *nutricium*s von Periostgefäßen gewährleistet wird [5, 256]. In Bezug auf das Os metatarsale I wird aus den Ergebnissen dieser Arbeit ohnehin eine untergeordnete Rolle der A. *nutrica* für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens vermutet (siehe Kap. 4.4). Die Hypothese von Periostgefäßen, oder anderen vaskuläre Strukturen, erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll.

### Zonen unter Risiko

Die hohe Relevanz der genauen anatomischen Kenntnisse der ernährenden Gefäße des Knochens ist in der Literatur mehrfach betont worden (siehe Kap. 1.1.3) [7, 49, 171, 240, 241, 310, 369]. Für das intraoperative Vorgehen in der Hallux-valgus-Chirurgie ist es durch Abstandsmessungen in Millimeter gelungen, eine Art „*sichere Zone*“ zu bestimmen, in denen die A. *nut.* mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht in den Knochen eintritt. Die Messungen erfolgten vom jeweils proximalen und distalen Gelenkspalt aus, wobei in der HV-Chirurgie eher eine Nähe zum MTP-Gelenkspalt während der Operation, als zum TMT-Gelenkspalt besteht (z. B. bei der häufig angewandten Kombination aus Chevron- und Akin-Osteotomie).

Durch diese Arbeit wird deutlich, dass das Foramen ca. 32 mm proximal des Metatarsophalangealgelenkspaltes und ca. 34 mm distal vom Tarsometatarsalgelenk aus liegt. Mit dem ähnlichen Ziel einer intraoperativen Sicherung der A. *nutricia*, untersuchten Jaworek et al. bereits 1973 den ersten Mittelfußknochen von elf Füßen. Jaworek et al. benannten einen durchschnittlichen Abstand von 27 mm der A. *nut.* vom MTP-Gelenk aus [150]. Dabei haben sie als Referenzpunkt nicht den Gelenkspalt, sondern die knorpelige Gelenkfläche genutzt, was die ca. 5 mm Differenz zu den Messungen dieser Arbeit erklären könnte. Beim Abstand des FN vom Tarsometatarsalgelenk aus, werden von einer anderen Studie ca. 30 mm beschrieben [232]. Auch hier lassen sich die 4 mm Unterschied durch die Messmethode erklären. Monreal-Redondo et al.

setzten zur Messung vom TMT-Gelenkspalt aus ein senkrechtes Lot an die wellige Oberfläche des proximalen Os metatarsale I [232]. In dieser Arbeit hingegen wurde vom mittigen Rand der medialen Gelenkfläche aus gemessen. Die Ossa metatarsalia dieser Studie waren im Mittel 66 mm lang. Monreal-Redondo et al. zeigten in ihrer Untersuchung eine TL (*total length*) von nur rund 60 mm, was ebenfalls die leichten Diskrepanzen in den Längenangaben (inklusive allgemeiner Messunsicherheiten) erklären könnte. Eine einheitliche Tendenz lässt sich hierbei trotzdem erkennen. Deutliche Inkonsistenz besteht jedoch zu einer aktuelleren Studie aus dem Jahr 2017 von Tonogai et al., die mittels Computertomografie den genauen Eintritt der A. nut. ins Os metatarsale I vom MTP- und TMT-Gelenk aus maßen. Sie beschrieben eine durchschnittliche Distanz zur A. nut. von  $22,6 \pm 3,1$  mm vom Metatarsophalangealgelenk aus [337]. Die Ergebnisse dieser Arbeit weichen bei durchschnittlich  $32,3 \pm 7,4$  mm von denen ab, und lassen sich am ehesten auf den Unterschied der Methoden zwischen Computertomografie und Fotografie zurückführen.

In der Gesamtheit lässt sich festhalten, dass die A. nut. nicht im proximalen Viertel und nicht im distalen Drittel in den ersten Mittelfußknochen eintritt. Diese Bereiche können daher als sichere Zonen beschrieben werden, in denen die A. nut. mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht getroffen wird. Diese Definition von sicheren Bereichen wurde zuvor auch an den Mittelhandknochen vorgenommen. Ähnlich zu den beschriebenen Zonen beim ersten Mittelfußknochen, erklärten Singla et al. den distalen und proximalen Schaft als unbedenklich, da das FN bei den Mittelhandknochen auch im mittleren Drittel in den Knochen eintritt [310].

Den genauen Eintrittspunkt der A. nut. und die Definition von sicheren Zonen, in denen diese intraoperativ nicht getroffen werden kann, ließ mehrere Hypothesen zum Vorkommen einer AVN nach Chevron-Osteotomie zu. Im Jahr 2013 wurde die Kombination aus einer distalen metatarsalen Osteotomie mit „*lateralen release*“ auf Risiken, wie die avaskuläre Nekrose, auch durch Schneider et al. untersucht. Die Autoren postulierten, dass eine Kombination erfolgen kann ohne das Risiko einer avaskulären Nekrose des ersten Mittelfußkopfes zu erhöhen. Voraussetzung dafür sei, dass die Osteotomie in einer sicheren Zone durchgeführt wird [296]. Diese sicheren Zonen konnten in dieser Arbeit eindeutig definiert werden und zeigen, dass die A. nut. bei Einhaltung dieser Zonen nicht geschädigt werden kann. Die Chevron-Osteotomie verläuft zentral im Mittelfußköpfchen [68, 158] und damit im sicheren beschriebenen distalen Drittel. Dies könnte u. a. die Sicherheit und guten Ergebnisse dieser Operation erklären. Die Autoren Schneider et al. heben mit der Forderung nach sicheren Zonen hervor, dass die Sicherheit der Kombination beider Verfahren von der Erhaltung des ernährenden Gefäßes abhängig ist. Weiter ist davon auszugehen, dass die Blutversorgung von der A. nut. hochrelevant für die Vitalität des Knochens ist und infolgedessen die Lokalisation der Osteotomie entscheidend ist für die Entstehung der AVN.

Ähnlich sehen Tonogai et al. die A. nut. als relevante und zu schützende Struktur in der Hallux-valgus-Chirurgie. Sie stellten einen kausalen Zusammenhang zwischen AVN und Schädigung der A. nutricia durch eine Überreizung oder Schädigung mit der Knochensäge her. Ihrer Beschreibung nach ist die A. nut. relevant für die intraossäre Versorgung [337], die bei Verletzung dann zur avaskulären Nekrose führen könnte. Diese Verbindung zwischen dem FN bzw. der A. nut. und der Osteonekrose wurde auch an anderen Regionen des Körpers festgestellt. Zu nennen ist hier eine Untersuchung über das FN im Bereich des Femurkopfes. Dabei konnte bei Femurköpfen mit Osteonekrose eine kleinere Gesamtfläche, ein kleinerer Durchmesser oder das Fehlen des Foramen nutricium, im Vergleich zu gesunden Femora, nachgewiesen werden [375]. Die Autoren schlossen daraus, dass der Zustand des Foramen nutricium ein Indikator für eine Osteonekrose sein könnte. Bezogen auf die AVN des Metatarsalköpfchens lässt sich konkludieren, dass ein ähnlicher Zusammenhang besteht und damit eine Schädigung des Foramen nutricium (z. B. durch eine Osteotomie) eine Nekrose im Mittelfußköpfchen begünstigen könnte. Unterstützend ist hier anzuführen, dass eine Nekrose des Femurkopfes hauptsächlich durch ein vorangegangenes Trauma entsteht [375].

Zusammenfassend kann die hohe Sicherheit der Chevron-Osteotomie im Metatarsalköpfchen durch die Schonung und den Erhalt der A. nutricia erklärt werden. Die Osteotomie erfolgt eindeutig außerhalb des risikobehafteten Bereiches und wird im Köpfchen in einer der „safe zones“ angewendet. Das Risiko einer ANV als Resultat einer vaskulären Schädigung, scheint dadurch drastisch minimiert. Die jedoch deutlich kontroversen Angaben in der Literatur zur Inzidenz der AVN zwischen 0 % und 40 % (s. Kap. 1.3.6) nach distalen Osteotomien werfen Fragen auf. Ist bei den Patienten mit AVN das Foramen nutricium an einer atypischen Stelle und liegt außerhalb der sicheren Zone? Oder ist das Verfahren von unterschiedlichen Operateuren mit leichten Abwandlungen angewandt worden, sodass z. B. ein Osteotomieschenkel der Chevron-Osteotomie in die Region der A. nutricia ragte? Wenn die A. nutricia der Schlüssel der Blutversorgung des Metatarsalköpfchens ist und als die relevante Struktur der AVN gesehen wird, warum sehen dann so viele Autoren die Ursache der AVN im „lateralen release“, welches nicht in der Nähe der A. nutricia stattfindet? Es ist in Frage zu stellen, ob die A. nut. wirklich die relevante Struktur für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens darstellt, oder ob eine Schädigung in einem anderen Bereich des Knochens ein höheres Risiko für die AVN ist (s. Kap. 4.4).

### 4.3 Propriozeption

Entgegen den Erwartungen und initialen Zielsetzung dieser Arbeit wurden Vater-Pacini-Körperchen, als schnell adaptierende Mechanorezeptoren, im lateralen Weichteilmantel des ersten Mittelfußknochens gefunden. Um die Arteria nutricia genauer zu charakterisieren, wurde

diese mit ihrem ca. 1x1 cm großen umgebenden Gewebe entnommen und nach histologischer Färbung mikroskopisch untersucht. Dabei konnten die Vater-Pacini-Körperchen in unmittelbarer Nähe zur A. nut. registriert werden. Diese liegen außerhalb der Bindegewebsscheide, die die A. nutricia umgibt. In einigen Proben fanden sich zudem mehrere Vater-Pacini-Körperchen, die stets durch die Bindegewebsscheide von der Arterie getrennt wurden. Es lässt sich festhalten, dass Propriozeptoren im lateralen Weichteilmantel des ersten Mittelfußknochens mit großer Nähe zum ernährenden Gefäß des Knochens auftreten.

Die damit gleichzeitig verbundene Nähe von VPK zu knöchernen Strukturen ist in der Literatur beschrieben worden und hat hinsichtlich der Biomechanik des menschlichen Körpers große Bedeutung. Die Existenz von VPK am Knochen bzw. an der Membrana interossea ist 2005 durch Rowe et al. demonstriert worden. Am Knochen sind die VPK, ähnlich wie in der Cutis, sehr sensibel für mechanische Reize und vibrotaktile Änderungen [290]. Eine „traubenartige“ Anhäufung der VPK zeigt sich nah an den langen Röhrenknochen der Extremitäten mit der Funktion, bspw. auf externe Bodenvibrationen oder Vibrationen durch Bewegungsaktivität zu reagieren [290]. Auch beschreiben Rowe et al. eine ausgeprägte nervale Versorgung im Bereich des Periostes und des Knochenmarks mit mechanosensitiven Fasern, die über das Foramen nut. in den Knochen eintreten. Durch diese räumliche Nähe wird ihnen die Funktion einer autonomen Regulation der Blutgefäße am Knochen zugesprochen [290]. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dies zur Lage der Mechanorezeptoren an der A. nut., und ihrer Nähe zum ersten Mittelfußknochen, unterstreichen. Es ist davon auszugehen, dass die beschriebene Funktion der VPK an langen Röhrenknochen auch für den kurzen ersten Mittelfußknochen gilt. Eine Regulation der Blutzufuhr zum Knochen bei Bewegung ist durch die Nähe zur A. nut. ebenfalls denkbar.

Die Rolle von Mechanorezeptoren als vermittelnde Struktur im Bewegungsablauf ist, neben den langen Röhrenknochen, auch in Gelenken untersucht worden. Vater-Pacini-Körperchen in Gelenkkapseln wird die Funktion der schnellen Registrierung von Druck- und Bewegungsänderungen des Kapsel-Band-Apparates zugesprochen [311]. Zugleich haben VPK an den ligamentären Strukturen von Gelenken eine indirekte Funktion bei der Gelenkstabilisation [165, 167]. Dementsprechend führt eine verminderte Propriosensorik in Gelenken zu einer Instabilität und begünstigt das Auftreten von Deformitäten [311]. Mechanorezeptoren in Gelenkkapseln leiten Informationen der Spannung dieser und der umgebenden Bänder an das zentrale Nervensystem. Durch zunehmende äußere Belastung, mit folglich eintretender Verformung der Sinneskörper, ist diese Informationsvermittlung verstärkt [284]. Ruffini-Körperchen im Hüftgelenk bspw. sind damit elementar für die statische Ausrichtung und Information der Lage des Körpers im Raum [311].

In Bezug auf den Fuß, und die zu detektierenden Informationen für den Bewegungsablauf, sind in der Vergangenheit viele Untersuchungen erfolgt. Dabei ist die Verteilung von VPK im

Bereich der Fußsohle bekannt und zur Detektion von Geschwindigkeitsänderungen während des Ganges (Körpergewichtsausgleich) oder Registrierung von Vibration des Untergrundes, als ideal erklärt worden. Während des Gehens werden Informationen über Vibrations- und Druckänderungen über Mechanorezeptoren von VPK detektiert. Informationen, wie der Zeitpunkt der Berührung der Fußsohle mit dem Boden oder der Körpergewichtsverlagerung, werden an das zentrale Nervensystem weitergeleitet und der weitere Bewegungsablauf daran angepasst [199]. Eine interessante zusätzliche Eigenschaft der VPK zeigen anatomische Untersuchungen bei Füßen von asiatischen Elefanten. Hier konnte eine hohe Dichte an VPK im Bereich des Vorderfußes gefunden werden, die nicht nur Bodenvibrationen übertragen, sondern auch seismische Wellen wahrnehmen und darüber eine Art Kommunikation zwischen den Tieren ermöglicht [35].

Die genaue Verteilung von VPK an der Fußsohle von Menschen untersuchten 2019 auch Jin et al. und stellten einen Vergleich zur Hand her. Sie wiesen eine baumartige Verteilung der VPK an der Fußsohle, ähnlich der Verteilung in der Hand, nach. Dabei herrscht in der Hand bekanntermaßen eine sog. distale Dominanz der VPK, was als Grundlage für das gute Tastempfinden der Finger beschrieben wird [168]. In der Fußsohle ist diese Dominanz nicht nachzuweisen. Hier sind hingegen die interdigitalen Räume mit einer hohen Dichte an VPK versehen. Jin et al. vermuteten darin, dass die VPK während des zweibeinigen Ganges das beschleunigte Körpergewicht und die Verteilung auf dem Vorfuß messen [152]. Sie beziehen zu diesem Lagekomplex auch die intermetatarsale Region am Os metatarsale I mit ein. Die Ergebnisse zu VPK an A. nut. passen in diesem Sinne zu der von Jin et al. aufgestellten Hypothese. Es zeichnet sich insgesamt das Bild eines für die Biomechanik hochsensiblen anatomischen Komplexes ab, wobei die VPK nah am Os metatarsale I und der A. nut. eine große Rolle in zusätzlicher Informationsvermittlung spielen könnten. Dass allgemein von einer ähnlichen Funktionsweise der Vater-Pacini-Körperchen in der Vibrationsdetektion ausgegangen werden kann, lassen mehrere vorangegangene Studien vermuten. Eine ähnliche immunhistochemische Färbung der VPK von mehreren Körperregionen im Vergleich zur Cutis, kann auf eine ähnliche Funktionsweise der Vater-Pacini-Körperchen hinweisen [106, 257]. Auch stimmen die Morphologie und der Aufbau der VPK, unabhängig ihrer Lage im menschlichen Körper, mit denen der Haut überein [143, 290, 318].

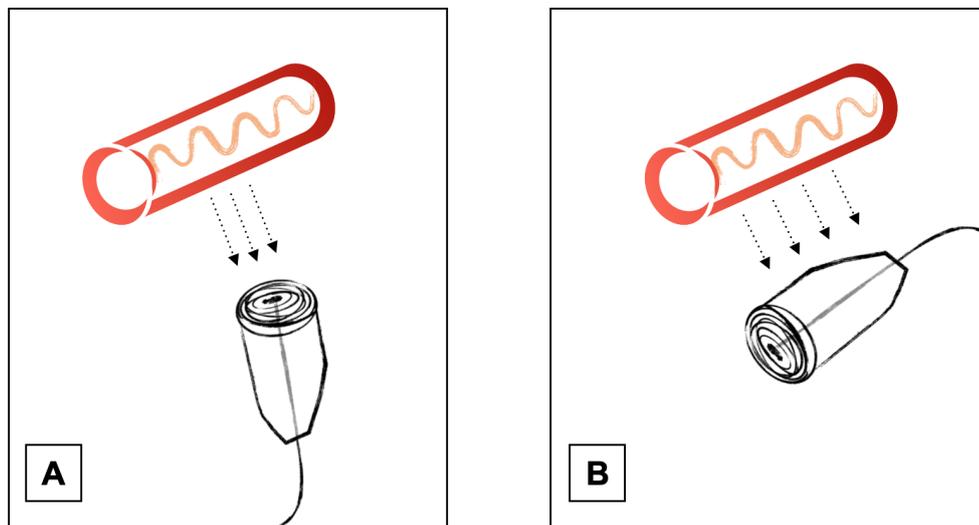
Bei Vater-Pacini-Körperchen an Gefäßen wird ebenfalls von einer Wahrnehmung von Vibrationsreizen ausgegangen. Dass diese an Gefäßen in unterschiedlichsten Regionen im menschlichen Körper vorkommen, ist in der Literatur beschrieben worden [235, 251, 370]. Eine Beschreibung von VPK an einer A. nut. ist in der Literatur (Stand August 2023) nicht gefunden worden, sodass die Ergebnisse dieser Arbeit die Vater-Pacini-Körperchen an der A. nutricia als neue Gegebenheit beschreiben. Die Nähe eines VPK zur A. nut., die sich interossär zwischen Muskulatur und Bindegewebe, und somit eindeutig außerhalb der Cutis befindet, wirft Fragen über ihre Funktion auf. Eine Detektion von Hautvibrationen ist aufgrund der Tiefe und Lokalisati-

on unwahrscheinlich. Ähnlich sehen dies Morishita et al., die im Bereich des Adduktorenkanals VPK an der A. femoralis nachweisen konnten. Sie vermuten ebenfalls eher eine Registrierung von Vibrationen durch veränderte Form der A. femoralis bei Bewegung [235]. Onishi et al. wiesen VPK im Bindegewebe der tiefen Gefäße, von der Verzweigung der A. subscapularis bis zur Bifurkation der A. ulnaris und radialis, des Oberarmes nach. Dabei waren die VPK unregelmäßig verteilt. Ein vermehrtes Auftreten war jedoch nahe dem Ellenbogengelenk zu registrieren. Die Autoren beschrieben ebenfalls einen direkten räumlichen Zusammenhang zwischen VPK, Gefäß und nervalen Strukturen [251]. Onishi et al. konkludierten aus ihren Ergebnissen, dass die VPK die Vibration von Blutgefäßen registrieren. Damit stimmen die Autoren der Hypothese von Morishita et al. zu und unterstreichen den funktionellen Zusammenhang zwischen Arterien und Mechanorezeptor. Spannend zudem ist die Tatsache, dass Onishi et al. die VPK rund um die Gefäße in der umgebenden Bindegewebsscheide fanden. Weiter nannten die Autoren, ähnlich wie in dieser Arbeit, aber auch VPK außerhalb dieser Bindegewebsscheide im lockeren umgebenden Bindegewebe und unterteilten demnach die VPK in zwei Gruppen: *perivaskuläre (pvLC)* und *extravaskuläre (exLC)* Lamellenkörperchen [251]. Spannend ist, dass die Mechanorezeptoren zwei unterschiedliche Lokalisationen zur Arterie einnehmen können. Der Fokus dieser Arbeit wurde initial nicht auf die Mechanorezeptoren gelegt, weshalb hierzu keine ausreichende Aussage getätigt werden kann. Eine zukünftige Studie zur Charakterisierung der exLC und pvLC, wäre zur Erkenntnis der Funktionen von VPK an Gefäßen sinnig.

Die Detektion von Gefäßveränderungen durch VPK wurde auch an größeren Arterien außerhalb des Bewegungsapparates vermutet. Eine Hypothese wurde bereits 1975 in Bezug auf Veränderungen im mesenterialen Blutfluss durch Aktivierung von Vater-Pacini-Körperchen aufgestellt [342]. Bedeutend dabei ist die Beobachtung, dass die VPK-Aktivität bei Steigerung des Blutdrucks über ein erhöhtes Blutvolumen zunimmt. Es lässt sich jedoch keine gesteigerte Impulsaktivität bei Blutdruckerhöhung durch vasokonstriktive Substanzen (z. B. Adrenalin) nachweisen [104]. Es wird deutlich, dass die VPK an Gefäßen durch räumliche Änderungen (Ausdehnungsgrad) aktiviert werden. Im Bereich größerer Arterien könnten die VPK daher als „Barorezeptoren“ fungieren.

In Hinblick auf die Existenz der VPK nah der A. nut., lässt sich schließen, dass die Pulsation dieser als vitales Zeichen registriert wird. Eine Fehlbelastung oder Fehlstellung des Vorfußes, die zu einem verminderten Blutfluss und reduzierter Pulsation in der A. nut. führen könnte, wird von VPK registriert und in Folge zentral als unbewusster Prozess korrigiert. Die Häufung und Verteilung der VPK um das Metacarpo- und Metatarsophalangealgelenk [109, 151, 191, 268, 283, 329], bedenke man vor allem Zustände wie die exzessive Dorsalextension und Plantarflexion der Zehen, unterstützen diese These. Zugleich könnten die VPK als Endorgansensoren am Fuß Blutvolumenänderungen registrieren und nach zentral vermitteln. Den Zusammenhang zwischen Dehnung des

Gefäßes durch Beugung des Armes mit darauffolgender Detektion durch ein VPK, vermuteten ebenfalls Onishi et al. am Oberarm. Sie beschrieben zunächst, dass das Gefühl der Gefäßvibration, anders als die Registrierung von Vibrationen an der Cutis, ein unterbewusster Prozess ist. Wird der Arm gebeugt, kommt es zur Formänderung der Gefäße mit einem turbulenten Blutfluss als Folge. Dies resultiert wiederum in einer Zunahme oder Abnahme der pulsierenden Blutbewegung [251]. Zur Wahrnehmung derer wird die Lage des Vater-Pacini-Körperchens zum Gefäß relevant. Die von Il'inskii 1968 beobachtete Reizschwelle der VPK, und damit einhergehende *optimale* Richtung der Stimulation, spielt hier eine Rolle. Der auf die Querachse des Gefäßes einwirkende Stimulus (siehe B in Abb. 4.1) benötigt eine deutlich geringere Intensität, als ein vertikal eintreffender Reiz [144].



**Abbildung 4.1:** Stimulation zwischen Gefäß und Vater-Pacini-Körperchen; A: Reiz trifft auf Längsachse, B: Reiz trifft auf Querachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach Il'inskii et al. [144]).

Die Arteria nutricia tritt an der lateralen Fläche des Os metatarsale mit einem Vater-Pacini-Körperchen ein. Eine direkt medial eintretende Reizung oder Manipulation, die im physiologischen Gang nicht vorkommt, stellt einen vertikalen eintreffenden Impuls auf das VPK dar. Nach den Beobachtungen von Il'inskii et al. muss dieser vertikal eintreffende Stimulus deutlich höher sein, als bei einem quer einwirkenden Reiz. Dies könnte einem zu eng anliegendem Schuh-

werk, einer Kompression bei unebenem Boden oder einem Distorsionstrauma entsprechen. Eine daraus folgende Formänderung der A. nut. mit verändertem Blutfluss könnte vom VPK registriert, die Verformung mit vermindertem Blutfluss nach zentral vermittelt und korrigiert werden. Die geringere Reizschwelle der VPK bei quer eintretender Reizung, ergibt in Hinblick auf eine zu ausgiebige Dehnung des Vorfußes Sinn. Die maximale physiologisch mögliche Dehnung der Weichteile um das Os metatarsale I könnte hierüber begrenzt werden. Da das Os metatarsale I mit dem fünften Mittelfußknochen den biomechanisch dynamischen Teil des Fußes darstellt, ergibt hier eine propriosensorische Messung durch VPK mehr Sinn, als am starren unbeweglichen Os metatarsale II. Demnach könnte im Gang oder beim schnellen Laufen, mit folglich vermehrten dynamisch wechselnden Positionen des ersten Mittelfußknochens, eine vermehrte Impulsaktivität des VPK erfolgen. Das Resultat könnte dann eine zentral, optimal angepasste Durchblutung an den Knochen darstellen (Weitstellung des Gefäßes bei zunehmender Kompression), vermittelt über VPK.

Die Verbindung zwischen Mechanorezeptoren und vaskulären Strukturen konnte nicht nur an großen Gefäßen in vorangegangenen Studien nachgewiesen werden. Demzufolge zeigten sich Vater-Pacini-Körperchen an den kleinen neurovaskulären Bündeln der Hohlhand und Finger. Anhäufungen wurden auch an den Muskelsehnen um das Metacarpophalangealgelenk und die proximale Phalanx der Finger nachgewiesen [151, 191, 268]. Dabei konnte eine sehr enge räumliche Beziehung zwischen den VPK und arteriovenösen Anastomosen gezeigt werden. Einige Autoren vermuten, dass Mechanorezeptoren auch an kleinsten Gefäßen mit der Regulation des lokalen Blutflusses in Zusammenhang stehen [191, 246]. Dies unterstützt die Untersuchung von Ye et al., die die Reduktion der Fingerdurchblutung durch Vibrationsreize nachwies. Sie schlussfolgerten, dass eine Steigerung der Vibration, und damit die Erhöhung der VPK-Aktivität, eine stärkere Vasokonstriktion hervorruft [246, 333, 373]. Relevant hierbei war zudem die Erkenntnis, dass die Vibrationswahrnehmungsschwelle mit der Reizschwelle der Vasokonstriktion korreliert, wodurch von einer gemeinsamen Vermittlung von Wahrnehmung und Vasokonstriktion ausgegangen werden kann [372].

Bezogen auf die Ergebnisse dieser Arbeit, lässt sich vermuten, dass die VPK nah der A. nut. und am Os metatarsale I ebenfalls eine Vasokonstriktion und die Vibrationswahrnehmung vermitteln. Denkbar ist zum einen die Vibrationsdetektion des Untergrundes beim Gang, und zum anderen die Vasokonstriktion als protektiver Mechanismus bei extremen Scherkräften. Zu nennen ist hierbei die These eines zentralen sympathischen Reflexes, der durch die Aktivierung der VPK ausgelöst wird [36, 104, 290, 372]. Es konnte in experimentellen Studien nämlich gezeigt werden, dass auch die Finger der *nicht* getesteten Hand eine Vasokonstriktion zeigen, was einen Reflexbogen wahrscheinlich macht [37]. Die Vermutung dieses Reflexbogens wurde in der Literatur schon oft getätigt, ist aber nicht bewiesen und bleibt damit spekulativ [370].

Die These einer reflektorischen Vasokonstriktion der A. nut. am Os metatarsale I durch Vibration als eine Art Vasospasmus, kann ebenfalls durch Erkenntnisse aus der Hallux-valgus-Chirurgie unterstrichen werden. Die A. nut. konstringiert bei schneller Änderung des mechanischen Impulses bspw. bei Bewegung oder durch intraoperative Manipulation. Ob diese Minderversorgung in einer avaskulären Nekrose resultiert, wurde in der Vergangenheit untersucht. Jones et al. beschrieben, dass eine Abnahme des Blutflusses zum Metatarsalköpfchen durch einen Vasospasmus oder durch eine massive Weichteilmanipulation intraoperativ zu erklären ist [158]. Des Weiteren schlussfolgerte der Autor, dass die Änderung im Blutfluss reversibel ist. Somit bestehe die Möglichkeit einer intraoperativen Manipulation und Abnahme des Blutflusses mit kompletter Reversibilität und Vitalität des Knochens im Verlauf. Dies könnte in Hinblick auf die diversen Angaben zur Häufigkeit der AVN eine Erklärung darstellen.

Die Theorie eines Vasospasmus der A. nut. unterstützen auch die Szintigrafie-Untersuchungen von Resch et al. [279], die anhand der Aufnahme eines Tracers in das Os metatarsale I bei und nach einer Chevron-Osteotomie, Rückschlüsse auf den Blutfluss in der A. nut. ziehen konnten. Sie zeigten durch die verminderte Traceraufnahme, dass am zweiten bis zum neunten postoperativen Tag es zu einer Abnahme in der Blutversorgung im Metatarsalköpfchen kam. Einer der Probanden hatte eine Chevron-Osteotomie mit einem „*lateralem Release*“, die restlichen lediglich die Chevron-Osteotomie. Alle Probanden hatten nach zwei bis vier Wochen wieder eine normale Aufnahme des Tracers und keiner entwickelte eine Osteonekrose, was einen Vasospasmus sehr wahrscheinlich macht. Unterstützend zu erwähnen ist hier auch die Studie von Thomas et al., die mithilfe der Röntgenuntersuchung folgende frühzeitige Veränderungen in der Knochenstruktur nach Chevron-Osteotomie mit LatR. festhielten: Sichelzeichen, Fleckung des Metatarsalkopfes, fokale röntgendurchlässige Bereiche. Bei 59 Patienten war kurz nach der Operation eine oder mehrere dieser Veränderungen zu verzeichnen. Nach einem Jahr zeigte sich eine komplette Heilung des Os metatarsale I und es waren keine Osteonekrosen nachweisbar [332]. Diese Untersuchungen verdeutlichen eine rein temporäre Abnahme des Blutflusses zum Metatarsalköpfchen, was für die These eines Vasospasmus spricht. Die blutverringende Vermittlung könnte durch ein Vater-Pacini-Körperchen an der A. nutricia erfolgt sein.

Hinzukommend zu betrachten sind Untersuchungen zu Veränderungen der Vater-Pacini-Körperchen bei Pathologien und Deformitäten wie dem Hallux valgus. Diese demonstrieren eine interessante Wechselwirkung zwischen dem Mechanorezeptor und dem umliegenden Gewebe. VPK können ihre Form ändern und sich insgesamt vergrößern (sog. *Vater-Pacini-Hyperplasie*). Eine derartige Hyperplasie der VPK konnte in den meisten Fällen in Geweben nachgewiesen werden, bei denen zuvor ein Trauma stattgefunden hatte [102, 151, 246, 324, 351]. Daraus lässt sich die Hypothese einer posttraumatischen, reaktiven Vergrößerung der Reaktionsfläche aufstellen, zur Vermeidung weiterer Traumata durch eine schnellere Reaktion. Ähnliches beschrieben Imai

et al., die die Vermutung formulierten, dass jedes biologische Ereignis, welches die Beziehung zwischen VPK und einer arteriovenösen Anastomose stört, eine neue Bildung von VPK induziert [145, 151]. Zusätzlich konnten morphologische Veränderungen der VPK bei Ischämie-Exposition nachgewiesen werden [177]. Die Beobachtung, dass es auch bei Erkrankungen wie dem Raynaud-Syndrom zu einer Hyperplasie der VPK kommt, zeigt, dass sich die Mechanorezeptoren an neue Gegebenheiten und Einflüsse adaptieren können. Dass es sich beim Raynaud-Syndrom um eine Erkrankung der kleinen Gefäße mit pathologischem Vasospasmus handelt, unterstreicht die Relevanz der VPK in ihrer Beteiligung an der Blutflussregulation. Es ist zu spekulieren, worin dabei genau der Ursprung besteht: Führen die großen VPK zu mehr Vasospasmus, oder verursacht der willkürliche Vasospasmus größere VPK, damit diese Änderungen durch Flächenvergrößerung besser wahrnehmen können [268]?

Diese Untersuchungen zeigen den direkten Zusammenhang zwischen VPK und Gefäßen und machen deutlich, dass mechanische oder traumatische Einflüsse Vater-Pacini-Körperchen in ihrer Größe und Anzahl beeinflussen können. Zugleich wird die hohe Plastizität und Anpassungsfähigkeit von Mechanorezeptoren deutlich. In Bezug auf die Pathologie des Hallux valgus wurden 2020 Mechanorezeptoren in der Gelenkkapsel des Metatarsophalangealgelenkes zwischen gesunden Füßen und Füßen mit Hallux valgus verglichen [311]. Bei den Gelenkkapseln der erkrankten Füße konnten Sirin et al. ein unregelmäßiges und unsortiertes Muster der Kollagenfasern nachweisen, wohingegen dies bei gesunden Füßen normal und regulär vorhanden war. Zudem wiesen sie mehr freie Nervenendigungen in HV-Füßen nach, wodurch sie schlussfolgerten, dass es zu einer Anpassung mit verminderter Propriozeption der Gelenkkapsel kommt [311]. Auch die Anzahl und die Art der Mechanorezeptoren scheint in krankhaft deformierten Gelenken (z. B. Schulter-, Hüft- und Kniegelenk) verändert zu sein [166, 311]. So ist die Hypothese beim Hallux valgus, dass eine initial erhöhte Dichte an Mechanorezeptoren adaptiv ist und zu Beginn der Deformität den Schmerz u. a. vermittelt. Durch die fortwährende Schädigung dieser im Verlauf, folgt dann die Gelenkinstabilität und die Zunahme freier Nervenendigungen [311]. Dieses Ergebnis unterstreicht zum einen die Relevanz von Mechanorezeptoren in Hinblick auf die Pathologie des HV und demonstriert den komplexen Zusammenhang zwischen Mechanosensorik und pathologisch verändertem Gewebe.

Mechanorezeptoren und ihr Zusammenhang mit Schmerzvermittlung stellen in Hinblick auf Schmerzen nach Operationen oder Verletzungen ein relevant zu erforschendes Gebiet dar, mit dem Potenzial neuer Erkenntnisse für protektive und rehabilitative Maßnahmen. Resümierend lässt sich über die Vater-Pacini-Körperchen an der A. nutricia festhalten, dass die Funktion der Vibrationsdetektion mit anschließender Vasokonstriktion der Arterie denkbar ist. So könnten VPK an der A. nutricia in einem anatomischen Komplex aus Ligamenten, Gelenkkapsel, Bindegewebe und Muskulatur den Blutfluss zum Knochen hin, am dynamischen Os metatarsa-

le I, regulieren. Ein Vasospasmus bei Manipulation, z. B. intraoperativ oder bei übermäßigen Scherkräften auf das Weichgewebe, kann eine vorübergehende Minderversorgung des ersten Mittelfußknochens erklären. Die enge Verbindung zwischen Mechanorezeptoren und Gefäßen ist deutlich, aber in Bezug auf die genaue Funktionsweise noch nicht abschließend geklärt.

### **Lamellenkörperchen**

In Proben dieser Arbeit zeigen sich neben VPK weitere Lamellenkörperchen, die von ihrer Morphologie nicht eindeutig den Vater-Pacini- oder Golgi-Mazzoni-Körperchen zugeordnet werden können. Sie weisen nicht die klassische runde Form auf, sondern sind zum Teil sternförmig mit abgerundeten Ausläufern. Ähnlich hingegen ist der lamellenartige Aufbau und die Existenz eines Kerns. Außerdem weisen sie eine ganz ähnliche Lokalisation wie die VPK auf und konzentrieren sich vor allem um das Gefäß außerhalb der Bindegewebsscheide. Ob diese Körperchen eine neue, unbekannte Entität von Sinnesrezeptoren darstellen, oder ob diese ganz anderen Strukturen entsprechen, ist in Frage zu stellen.

Spannenderweise erwähnten auch Morishita et al. in ihrer Studie Lamellenkörperchen nah der A. femoralis, die große Ähnlichkeit zu den Lamellenkörperchen dieser Arbeit aufweisen [235]. Morishita et al. ordneten diese Körperchen von der Morphologie und Lokalisation her am ehesten den VPK zu. In gleicher Weise berichteten Onishi et al. in ihrer Arbeit von ähnlich aufgebauten Lamellenkörperchen entlang der tiefen Gefäße des Oberarmes. Auch sie differenzierten zwischen diesen und klar zu identifizierenden Vater-Pacini-Körperchen. Morphologisch gleichen die von Onishi et al. abgebildeten Körperchen sehr denen dieser Arbeit, mit entrundeter fast sternförmiger Kontur und lamellenartigem Aufbau [251]. Die Autoren konkludierten, aufgrund der ähnlichen Morphologie der Lamellenkörperchen zu den VPK an den Gefäßen des Oberarmes, dass diese mehrere Axone bzw. verzweigtere Axone als VPK aufweisen könnten [251]. Ihre Funktion als Vibrationsdetektoren, wie die VPK, ist nach Angabe der Autoren anzunehmen. Aufgrund der kleineren Größe der Lamellenkörperchen im Vergleich zu VPK in der Hand, schlussfolgerten Onishi et al., dass diese an Gefäßen Vibrationen mit niedrigerer Frequenz wahrnehmen könnten. Ähnliche lamelläre Körperchen zeigten sich auch nah der Pancreasarterie, die sich weiter eindeutig morphologisch unterscheiden von Lamellenkörperchen *im* Pancreasgewebe [106]. Die VPK um die Pancreasarterie wiesen dabei, wie die VPK der Haut und der im Pancreasgewebe befindlichen VPK, ein ähnliches immunhistochemisches Profil auf. Ihre Funktion wird in der Detektion von Vibration, Druck und Dehnung des Peritoneums (Wahrnehmung abdomineller Schmerzen) gesehen. Die Nähe zur Pancreasarterie oder Lymphgefäßen wurde in der Literatur auch mit der Regulation des Blutflusses in Zusammenhang gebracht. Die genaue Rolle von VPK viszeral bleibt gemäß den Aussagen der Autoren ebenfalls spekulativ [106, 320].

Es lässt sich vermuten, dass es sich bei den beschriebenen Lamellenkörperchen um eine neue Entität oder um Vater-Pacini-Körperchen handelt, die während des Aufbereitungsprozesses (Präparation, Entwässerung, Einbettung, Färbung etc.) verändert oder beschädigt wurden. Ihre Funktion an der A. nut. könnte, wie von Onishi et al. vermutet, ebenfalls in der Detektion von niedrigeren Frequenzen der Vibration liegen. In diesem Sinne würde die A. nut. am Knochen über ein hochsensibles System der Propriosensorik verfügen. Auf geringste Unterschiede im Blutfluss oder Blutdruck der A. nut. könnte so reagiert werden. Welche genauen Reize von welcher Art der Sinnesrezeptoren detektiert werden, müsste gezielt erforscht werden.

#### 4.4 Havers-Kanäle

Die Havers- und Volkmann-Kanäle führen die versorgenden Blutgefäße durch den Knochen und bilden damit ein komplexes Netzwerk, welches die Knochenarchitektur prägt. Geht man von einer hohen Blutversorgung bei hoher Anzahl von Havers-Kanälen im Knochengewebe aus, so lassen sich deutliche Unterschiede im Os metatarsale I festhalten. In dieser Arbeit kann eine hohe Dichte an Havers-Kanälen im Schaftbereich beschrieben werden. Im Metatarsalköpfchen hingegen sind deutlich weniger Havers-Kanäle vorhanden. Zudem zeigen diese einen größeren Durchmesser im Vergleich zu denen im Schaftbereich. Genauer betrachtet, beträgt die Haverskanalanzahl im Bereich des Schaftes beim Os metatarsale I im Mittel 14 Stück pro  $\text{mm}^2$ . Eine derartige Messung wurde am ersten Mittelfußknochen zuvor noch nicht vorgenommen.

Eine Studie aus dem Jahr 2021 am menschlichen Femur berichtete auf vergleichbare Weise über die Anzahl der Havers-Kanäle. Sie beschrieben ähnlich zu unseren Werten 15,603 Havers-Kanäle/ $\text{mm}^2$  bei Frauen und 17,445/ $\text{mm}^2$  bei Männern im Femurschaft [229]. Es ist bemerkenswert, dass trotz der sehr unterschiedlichen Knocheneigenschaften zwischen Femur und erstem Mittelfußknochen, die Haverskanaldichte im Schaft doch so ähnlich zu sein scheint. Damit liegt die Hypothese nahe, dass diese unabhängig der mechanischen Eigenschaften von Knochen, eine bestimmte Mindestanzahl an blutversorgenden Kanälen benötigen.

Pazzaglia et al. forschen ausgiebig an der Knochenstruktur, ihrer dreidimensionalen Darstellung und den Prozessen des *Remodelings*. Sie stellten die These auf, dass die Haverskanalgröße mit der Umbauaktivität im Knochen korreliert. So wird in der Literatur von der Größe ossärer Resorptionsräume auf den Haverskanaldurchmesser geschlossen [59, 267]. In Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen, wiesen auch Pazzaglia et al. eine erhöhte Haverskanaldichte im Bereich des mittleren Schaftes, im Vergleich zum distalen Schaft, beim Femur des Hasen nach [259]. Weiter beschrieben sie ein erhöhtes *Remodeling* im distalen Schaft. Auch wenn der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Größenmessung der einzelnen Havers-Kanäle lag, so zeigte sich im Flächenanteil des Knochens, der für die Durchblutung genutzt wird, kein signifikanter Unter-

schied zwischen Caput und Schaft. Es scheint, dass die Havers-Kanäle im Caput größer sind und damit mehr Fläche bei weniger kompakter Knochenstruktur einnehmen. Im Gegensatz dazu sind Havers-Kanäle im Schaft kleiner, die Dichte hingegen höher. Bezogen auf die These von Pazzaglia et al., würden die Ergebnisse dieser Arbeit die erhöhte *Remodelingrate* im distalen Schaft bei größeren Kanälen unterstreichen. Die höhere Haverskanaldichte im Bereich des Schaftes sehen die Autoren ebenfalls im Zusammenhang mit der höheren Dichte an Blutgefäßen im Schaftbereich. Durch diese Arbeit kann unterstützend hinzugefügt werden, dass die A. nutricia am häufigsten in die Schaftregion eintritt und die Dichte an Havers-Kanälen hier am höchsten ist. Ebenfalls decken sich die Untersuchungen mit unseren Erkenntnissen dahingehend, dass es keinen Unterschied der Kanaldichte zwischen dorsalen, ventralen, medialen und lateralen Ebenen des Knochens gibt [259]. Dies ist auch in Hinblick auf das Knochenmark und seiner Funktion, welches sich hauptsächlich in der Diaphyse befindet, relevant [10, 181]. Das Bild eines gut vaskularisierten Schaftes durch hohe Haverskanaldichte und eine dort eintretende A. nut. wird deutlich.

Zu diesen Überlegungen muss einschränkend hinzugefügt werden, dass Havers-Kanäle nicht als einzelnstehende Strukturen zu betrachten und zu beurteilen sind. Trotz neuerer dreidimensionaler Rekonstruktionen und CT-Bildgebungen sind die Anfänge und Enden des Haverskanalnetzwerkes noch unvollständig in der aktuellen Literatur erfasst [69, 206]. Nicht berücksichtigt wurde in dieser Arbeit die Tatsache, dass der Osteonendurchmesser mit dem Alter abnimmt und der Durchmesser der Havers-Kanäle eher zunimmt [58, 71, 131, 159, 208]. Auch beeinflusst das Körpergewicht den Durchmesser, sodass die Kanäle eher einen größeren Durchmesser bei leichtem Körpergewicht aufweisen [39, 58]. Der genaue Mechanismus zwischen Osteongröße und physiologischen Prozessen im menschlichen Körper ist aktuell aber noch nicht eindeutig geklärt [207, 344]. Es zeigt jedoch den Zusammenhang zwischen Haverskanalnetzwerk und bspw. mechanischer Beanspruchung. In einer Studie zur Haverskanaldichte innerhalb der Clavicula formulierten Crane et al. die Hypothese, dass die Dichte der Haverssysteme an Stellen stärkerer und häufigerer mechanischer Beanspruchung erhöht ist. Weiter stellten die Autoren die Vermutung auf, dass die Haverskanaldichte eine Aussage über die Belastungshistorie des Knochens erlaubt. Die geringste Dichte an Havers-Kanälen zeigte sich hier im Bereich des mittleren Schaftes (verglichen mit der acromialen und sternalen Region) [69]. In Bezug auf das Os metatarsale I können wir diese These nicht annehmen, da beim Gang die größte Belastungszone im Bereich des Metatarsalköpfchens und nicht im Schaft liegt [117, 141]. Durch die unterschiedliche Funktion, Region, Ursprung und Belastung der Clavicula und dem Os metatarsale I, ist ein Vergleich jedoch allgemein vage. Doch zeigt auch diese Studie an der Clavicula eine Variation der Haverskanaldichte innerhalb eines Knochens [69].

Den Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung und Haverskanaldichte vermuteten ebenfalls Miszkiewicz et al., die archäologische Femora eines pazifischen Volkes untersuchten. Dabei zeigten sie eine allgemein geringere Haverskanaldichte bei Frauen. Sie formulierten die Hypothese, dass die weiblichen Knochen weniger mechanisch stimulierten Knochenumbau erfahren und daher allgemein weniger Havers-Kanäle vorhanden sind [229].

Es lässt sich zusammenfassen, dass auf mehr mechanische Belastung des Knochens ein erhöhter Knochenumbau folgt, der eine erhöhte Haverskanalanzahl verlangt. Hier einzubeziehen ist die Osteonenanzahl, die sich an mehr beanspruchten Knochenregionen erhöht [228]. Dabei zeigen diese Zonen, mit hoher mechanischer Beanspruchung und Spannung, vergleichsweise kleinere Osteone und einen geringeren Haverskanaldurchmesser [344]. Im Sinne dessen beschrieben auch van Oers et al. kleine Osteonendurchmesser in der Kompressionszone langer Röhrenknochen. Die gegenüberliegende Zugseite zeigt hingegen große Osteone mit weiten Havers-Kanälen. Bei den Ossa metatarsalia entspricht die unter Zug stehende Region der plantaren, die unter Kompression stehende Region der dorsalen Knochenfläche [203]. In Folge dessen müssten die Havers-Kanäle einen unterschiedlichen Durchmesser an den dorsalen und plantaren Knochenflächen zeigen. Dies ließ sich in dieser Arbeit nicht beobachten, jedoch stand dies auch nicht im Fokus der Untersuchung. Eine unterschiedliche und an Belastung angepasste Kanalarchitektur stellt eine spannende und weiter zu erforschende Hypothese dar. Die These, dass dort wo viel Belastung auf dem Knochen herrscht, mehr Havers-Kanäle vorhanden sind, kann für das Os metatarsale I jedoch nicht angenommen werden. Das Caput ist die größte mechanische Belastungszone und zeigt eine geringere Haverskanalanzahl als der Schaft. Dafür sind hier die Kanäle größer und nehmen mehr Knochenfläche ein. Für den ersten Mittelfußknochen gilt also an der Hauptbelastungszone eine geringe Kanaldichte mit jedoch größerer Fläche insgesamt. Ob dies damit eine ausgeglichene Durchblutung ermöglicht, wie die Gegebenheit mit vielen aber kleineren Havers-Kanälen, ist in Frage zu stellen. In Bezug auf die Thesen von van Oers et al. und Crane et al., kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit der Zusatz hinzugefügt werden, dass je nach Knochen und jeweiligem biomechanischen Profil (Röhrenknochen vs. kurze Röhrenknochen) eine unterschiedliche Architektur der Havers-Kanäle vorliegen kann.

Interessante weitere Thesen zur Knochenarchitektur wurden in Bezug auf Mechanorezeptoren in der Literatur aufgestellt. Die Resultate einer Studie mit Tibiae von Ratten zeigten den Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung und Ausrichtung der vaskulären Kanäle innerhalb des Knochens. Dabei stellten die Autoren die berechtigte Hypothese auf, dass während des Knochenwachstums ein Mittel der Mechanosensorik notwendig sein muss, um den Einbau der Gefäße in den Knochen zu kontrollieren [38]. Die in dieser Arbeit untersuchten Knochen befanden sich zwar nicht mehr in einer Phase des Wachstums, doch ließen sich Vater-Pacini-Körperchen an einem für die Knochendurchblutung relevanten Gefäß nachweisen. Es wird deutlich, dass

die Mechanosensorik mit der Knochenstruktur, seiner Gefäßintegration, dem *Remodeling* und Wachstum eng in Verbindung stehen könnte. Eine mechanosensorische Eigenschaft wird dabei z. B. den Osteozyten zugeschrieben, die Dehnungen durch interstitielle Flüssigkeitsänderungen im lacuno-kanalikulären Netzwerk registrieren [11, 47, 174, 226, 269, 347]. Einige Autoren sehen sogar einen Ursprung in der Frakturanfälligkeit bei Knochen älterer Menschen in der reduzierten Mechanosensorik der Osteozyten [31, 226, 234]. Untersuchungen hierzu sind aktuell rar [38, 346]. Die in dieser Arbeit formulierten Mechanorezeptoren könnten auch in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen.

### **Gefäßplexus am Metatarsalköpfchen**

Der Schaft ist gut durch die A. nut. und das prägnante Haverskanalsystem mit Blut versorgt. Die geringe Haverskanaldichte im Metatarsalköpfchen wirft Fragen auf über die Versorgung dieses Bereiches durch die A. nutricia. Diese kann, anders als im Schaftbereich, das Blut für die Versorgung nicht allein über das Haverskanalnetzwerk zum Köpfchen leiten, da dieses am Caput nur gering ausgebildet ist. Die Bedeutung der A. nut. für das Metatarsalköpfchen ist zu hinterfragen. In Hinblick auf die Hallux-valgus-Chirurgie könnten im Umkehrschluss andere anatomische Strukturen von größerer Relevanz sein.

Die Vaskularisation von Röhrenknochen erfolgt im Bereich der Diaphyse hauptsächlich über die A. nutricia [282]. Im Bereich der Metaphyse über nah anliegende Arterien. Die Epiphysen werden durch periartikuläre Äste versorgt [359]. Es lassen sich somit an langen Knochen drei große Gefäßgebiete zusammenfassen: die diaphysären, metaphysären und epiphysären Arterien [232]. Über endostale Arterien verbindet sich das Gefäßnetzwerk der A. nut. mit denen der Meta- und Epiphysen. Die Epiphyse kann leichter infarzieren als der metaphysäre oder diaphysäre Knochen [44, 321]. Das Ergebnis einer geringeren Haverskanaldichte im Caput unterstreicht dies. Das Caput des ersten Mittelfußknochens ist eher abhängig von periartikulären Gefäßästen als vom Haverskanalnetzwerk. Den Eintritt dieser Gefäße in das Metatarsalköpfchen gilt es zu diskutieren, da von einem einzelnen Foramen nutricium, wie im Schaftbereich bei der A. nutricia, nicht ausgegangen werden kann.

In der Literatur wurden hierzu die Untersuchungen des intraossären Gefäßsystems aufgrund der harten, verkalkten Knochenstruktur schon immer als eine Herausforderung angesehen [253, 277]. In der Vergangenheit wurde häufig die zeitaufwendige und fehleranfällige Spalteholz-Technik angewendet, um den z. B. zuvor in Gefäße injizierten Farbstoff darzustellen. Neuere Methoden verzichten auf das Herstellen von Transparenz und verwenden dünne Schnitte aus Epoxidharz [225, 253, 317]. Eine ältere Spalteholzstudie von Jones et al. wies bereits ein ausgeprägtes extraossäres Gefäßnetzwerk um das Caput des Os metatarsale I nach. Dieser Gefäßplexus wurde von den Autoren als eindeutig extrakapsulär beschrieben. Sie sehen auch darin

den Grund, warum bei korrekt durchgeführter Chevron-Osteotomie kein Risiko einer AVN besteht, da dieses Verfahren eindeutig extrakapsulär angewandt wird [158]. Zugleich verglichen die Autoren zusätzlich auch die Farbintensität nach Injektion eines Farbstoffes innerhalb des Metatarsalköpfchens im normalen Knochen und nach einer Chevron-Osteotomie. Innerhalb der nicht operierten ersten Mittelfußknochen zeigte sich eine durchweg adäquate Farbanreicherung innerhalb aller vier Quadranten des Metatarsalköpfchens. Diese ließ sich in der operierten Gruppe, in der das Köpfchen nach erfolgter Osteotomie verschoben wurde, nicht mehr nachweisen. Lediglich konnten hier nur kleine Mengen des injizierten Farbstoffes in Gefäßen der Kapsel erkannt werden [158]. Es zeigt, dass durch die Operation das Metatarsalköpfchen so verschoben bzw. manipuliert wurde, dass der Farbstoff nur noch bis an die Kapsel heranreichte. Dies unterstützt die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Arbeit. Die Haverskanaldichte ist im Bereich des Schaftes am größten, wohingegen das Metatarsalköpfchen wenige Havers-Kanäle aufweist. Das Metatarsalköpfchen wird durch ein extraossäres vaskuläres Netzwerk versorgt und ist von diesem abhängig. Dass die Farbanreicherung hauptsächlich noch in Kapselgefäßen nachzuweisen war, unterstreicht diese Annahme.

Der Ursprung dieses vaskulären Netzwerks um das Metatarsalköpfchen wurde in vorherigen Untersuchungen identifiziert. So erläuterten Rath et al. 2009, dass die erste A. metatarsalis plantaris im medialen plantaren Weichteilmantel nach distal zum Caput verläuft und dort eine bis vier Äste zum Kopf abgibt. Genauer treten diese kleinen Äste an der Ansatzstelle der Gelenkkapsel ein oder laufen durch die Gelenkkapsel zum ersten Metatarsalköpfchen [277]. Diese plantar eintretenden Gefäße konnten in dieser Arbeit ebenfalls nachgewiesen werden und wurden als Nebengefäß bezeichnet. Es zeichnet sich ab, dass die extraossäre Versorgung des Caputs bedeutender ist als die der intraossären über Havers-Kanäle und die A. nutricia. Deutlich wird dabei die anatomische Relevanz der Gelenkkapsel, die diese extraossären Gefäße schützt und heranführt.

Die untergeordnete Rolle der Havers-Kanäle für die Blutversorgung des Kopfes unterstreichen auch die Ergebnisse von Kuhn et al., die während der Chevron-Osteotomie den Blutfluss ins Metatarsalköpfchen mittels Laser-Doppler maßen. Die größte Reduktion des Blutflusses (45% Abnahme) zeigte sich im Schritt der medialen Kapsulotomie und *nicht* während der Osteotomie nah an der A. nutricia. Würde das Metatarsalköpfchen von der intraossären Blutversorgung abhängen, dann wäre die größte Abnahme des Blutflusses beim Durchtrennen des Knochens zu messen. Bedenke man dies, so müsste die allgemeine Inzidenz an AVN nach Osteotomien drastisch höher sein, als berichtet. Bezüglich des Fehlens einer AVN auch in ihrer Stichprobe schlussfolgerten Kuhn et al. jedoch anders, dass die eher proximale Osteotomie die distalen Gefäße für den Blutfluss zum Mittelfußkopf nicht beeinflusst. Sie nannten zudem die große Spongioaoberfläche nach der Chevron-Osteotomie, die vor einer AVN bewahrt [180]. Die Ergebnisse

dieser Arbeit lassen sich jedoch gut mit der gemessenen maximalen Reduktion des Blutflusses vereinbaren. Demnach zeigten Kuhn et al. deutlich, dass die Kapsel die entscheidende Struktur für den Blutfluss darstellt. Dies ergibt in Hinblick auf die schwächliche Haverskanalversorgung an dieser Region Sinn. Wird die Kapsel zu exzessiv manipuliert, resultiert eine Minderversorgung des Metatarsalköpfchens und dadurch das erhöhte Risiko einer AVN.

Auch der Orthopäde Melvin Jahss vermutete Ähnliches zur Entstehung einer AVN. In einem Vorwort der Fachzeitschrift „*foot and ankle*“ erläuterte er die Ursache der AVN in der Unterbrechung der Blutversorgung, die auf zwei Arten geschieht: zum einen durch die Osteotomie des Kopfes und zum anderen durch ein exzessives Ablösen der Blutgefäße beim Ablösen der Kapsel bzw. beim Ablösen der Adduktorsehne [147]. Zu diesem Schluss kamen ebenfalls Klosok et al. und fassten nach einer prospektiven randomisierten Studie, mit dem Vergleich zwischen der Chevron- und der Wilson-Osteotomie, Folgendes zusammen: Eine übermäßige Kapselresektion kann zu einer avaskulären Nekrose eines Teils oder des gesamten Mittelfußkopfes führen, da nach einer Osteotomie die *einzig* verbleibende Blutversorgung über die Kapsel erfolgt [175]. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen dies durch die geringe Haverskanaldichte am Caput deutlich. Das beschriebene plantare Nebengefäß könnte dabei eines der prominenten Äste des Gefäßplexus darstellen.

Der Autor Dhukaram beschrieb auch, dass der arterielle Gefäßplexus bei Schädigung zur Nekrose des Mittelfußkopfes führt, bezog dieses jedoch, aus Sicht dieser Arbeit fälschlicherweise, auf die Osteotomieschnitte und nicht auf die exzessive Ablösung der Kapsel [82]. Zur Risikominimierung der AVN bei der Chevron-Osteotomie ist dazu die optimale Ausrichtung der Schnitte genannt worden. So soll die Chevron-Osteotomie mit einem langen plantaren Schenkel durchgeführt werden, der proximal des Gelenkkapselansatzes austritt [68, 81]. Dabei werden die plantaren Kapselgefäße geschont und die Osteotomie manipuliert das Weichgewebe nicht. Es ist denkbar, dass der Erfolg der Chevron-Osteotomie und ihre dokumentierte Sicherheit sich unter anderem darauf gründen. Hingegen lassen die Ergebnisse dieser Arbeit die genannten Theorien zur Osteotomie fragwürdig erscheinen, da eine Osteotomie das allenfalls nur schwächlich ausgebildete Haverskanalsystem im Caput unterbrechen würde. So ist es eigentlich irrelevant, wie und wo genau die Osteotomie erfolgt, da die entscheidenden Strukturen extraossär liegen. Dies könnte auch erklären, warum bei so vielen verschiedenen angewendeten Operationsmethoden mit unterschiedlichsten Osteotomien (z. B. proximal an der Basis oder durch den gesamten Schaft) keine, in Bezug auf die AVN, eindeutig negativ heraussticht. Wenn die Osteotomie das Problem darstellen würde, müsste bei einer Scarf-Osteotomie, mit horizontaler Unterbrechung des Schaftes, doch von einer deutlich höheren Inzidenz der AVN berichtet werden. In der Literatur wird jedoch die AVN hauptsächlich mit der distalen Chevron-Osteotomie in Verbindung gebracht. Der Fokus ist daher nicht auf die Osteotomie an sich zu legen, was die Ergebnisse zu

den Havers-Kanälen nochmal hervorhebt. Es wird deutlich, dass die relevanten Strukturen für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens die Kapsel und das umgebene Weichgewebe sind. Bei einer intraoperativen massiven Manipulation können diese gestört werden und das Risiko einer AVN mutmaßlich erhöhen. Der Fokus intraoperativ ist also auf den Gefäßplexus zu richten. Dieser befindet sich an der Plantarseite des ersten MT-Halses unmittelbar proximal der Kapselinsertion [82, 210, 277].

Dass es sich um einen Gefäßplexus mit mehreren kleinen Ästen handelt, und nicht um ein großes Gefäß wie die A. nut., zeigten Sammarco et al. in einem ausführlichen Review über die Komplikationen der HV-Chirurgie. Sie beschrieben, dass beim Auftreten einer AVN, diese bei einer signifikanten Anzahl von Patienten das Metatarsalköpfchen nur *partiell* betrifft [292]. Es ist denkbar, dass bei einer intraoperativen Schädigung des Gefäßplexus immer noch kleine Äste vorhanden sind, die bis zu einem gewissen Grad den Verlust kompensieren könnten. Wird hingegen die gesamte plantare Gelenkkapsel abgelöst, so ist von einem Kollaps der Blutversorgung mit AVN als Folge auszugehen. Das beschriebene Nebengefäß in dieser Arbeit hebt dabei hervor, dass die großlumigen Äste dieses Gefäßplexus sich im plantaren Bereich der Kapsel befinden und somit für den Fall einer notwendigen Kompensation hochrelevant sind. Diese Tatsache gibt dem daneben befindlichen Sesambeinkomplex eine bedeutende Rolle, der in Hinblick auf den Weichteileingriff berücksichtigt werden sollte. Dieser anatomische Verbund an Bindegewebe, Ligamenten und Knochen führt und schützt die kleinen Äste des Gefäßplexus, die plantar in den Metatarsalkopf eintreten [355].

In Zusammenschau der Ergebnisse dieser Arbeit lässt sich die Vermutung formulieren, dass das beschriebene Nebengefäß einem größeren Gefäß aus dem genannten Gefäßgeflecht am Caput entspricht. Am Os metatarsale I beschrieben 2003 Monreal-Redondo et al. bei der Präsenz doppelter Foramina weiter, dass eine zweite A. nut. von plantar an das Os metatarsale herantritt [232]. Ihre Ergebnisse unterstützen den Fund unseres plantaren Nebengefäßes, jedoch würden wir hierbei nicht von einer zusätzlichen A. nut. sprechen, sondern das Gefäß dem Gefäßplexus zuordnen. Interessanterweise werden die Metatarsalköpfchen der restlichen Metatarsalknochen hauptsächlich von einer plantaren metaphysären Arterie versorgt [22]. Dass dieses Nebengefäß elementare Bedeutung für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens hat, zeigten auch Untersuchungen von Robinson et al., die explizit die Schonung des plantaren Weichteilmantels betonen. Sie stellten fest, dass der entscheidende Punkt, eine AVN bei der Chevron-Osteotomie zu vermeiden, in der Schonung der plantaren Weichteile am Caput liegt [286]. Dies unterstreicht allgemein die Bedeutung der Kapselgefäße und stimmt mit unseren Ergebnissen zum Nebengefäßes überein. Das Nebengefäß befand sich in den Proben dieser Arbeit am häufigsten am plantaren Caputbereich. Gleichzeitig schwächen diese Ergebnisse den Einfluss der A. nut. auf die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens erneut ab. Unterstützend hierzu kann noch einmal

die Studie von Rath et al. angeführt werden. Sie führten bei ihrer Spalteholzstudie zusätzlich eine Scarf-Osteotomie durch, wobei sie eine eindeutige Beschädigung des medialen und dorsalen Weichteilmantels feststellten. Sie formulierten aus den Ergebnissen ihrer Arbeit, dass die distale vertikale Osteotomie beim Scarf- oder bei der Chevron-Osteotomie mind. 6 mm vom Gelenkknorpel entfernt sein sollte. Zum Schutz der plantaren Versorgung wird ein 8 mm Abstand zur Knorpellinie empfohlen. Die Autoren konkludierten, dass die A. nut. für das Caput entbehrlich zu sein scheint, da es trotz intraoperativer Schädigung dieser selten zu einer AVN kommt. Die Bedeutung der A. nut. für das Caput des Os metatarsale I wird unterstützend zu den Ergebnissen dieser Arbeit weiter abgeschwächt und zeigt die Relevanz des plantaren Anteils des Gefäßplexus [277, 361].

Auf die Relevanz besonders des lateralen Weichteilmantels gingen 2010 Luria et al. ein, die eine Empfehlung zur Vermeidung der AVN auch in dem Erhalt dieses sehen. Die Autoren erläuterten, dass sie bei der Osteotomie die laterale Kortikalis nicht mit der oszillierenden Säge berühren, sondern dann auf ein Osteom wechseln. Sie postulierten damit, dass der laterale Weichteilmantel auf diese Weise unbeschädigt bleibt und sehen darin eine protektive Strategie zur Vermeidung einer AVN [201]. Die hohe Relevanz des lateralen Weichteilmantels des Metatarsalköpfchens sowie des plantaren Ansatzes der Kapsel im Rahmen der Hallux-valgus-Chirurgie, betonten auch 2017 Stukenborg et al. . Diese Strukturen sollten nach Möglichkeit erhalten bleiben, um die Durchblutung des Köpfchens nicht zu kompromittieren [328]. Die Wichtigkeit des lateralen Weichteilmantels wird durch eine andere Studie jedoch herabgesetzt. Nach Durchtrennung des lateralen Kollateralbandes beim Weichteileingriff erläuterten die Autoren, dass das Eröffnen der lateralen Gelenkkapsel keinen Einfluss auf die Durchblutung hatte. Weiter wurde beschrieben, dass eher die Erhaltung des plantaren und proximalen Ansatzes der Gelenkkapsel bedeutend ist, um Störungen der Gefäßversorgung des Mittelfußkopfes zu vermeiden. Ferner führe eine exzessive Ablösung der plantaren Gelenkkapsel zu einer Instabilität und Überkorrektur der Deformität [296]. Die Autoren sehen die Gelenkkapsel damit als zentralen Stabilisator des Gelenks und relevant für die Gewährleistung der Blutversorgung. In Anbetracht dieser Risiken sollte von einer Manipulation der plantaren Gelenkkapsel dringend abgesehen werden.

### **Minimalinvasive Verfahren**

Zu erwähnen sind ebenfalls die Ergebnisse der jüngeren minimalinvasiven Verfahren, die neben kurzen Stichinzisionen die Osteotomie weiter proximal außerhalb der Gelenkkapsel platzieren. Die minimalinvasive Operationstechnik, so Karry et al., schont somit vor allem die relevanten plantaren Anteile der Gelenkkapsel. Das fehlende Auftreten einer AVN in dieser Studie stützt diese These [163]. Auch die Ergebnisse einer anatomischen Studie von DelVecchio et al. aus dem

Jahr 2019, die die minimalinvasive Methode *PeICO*<sup>13</sup> untersuchten und ein LatR. durchführten, sind hier zu erwähnen. Beim LatR. durchtrennten sie nur eine Abduktorsehne und einen kleinen Anteil der lateroplantaren Kapsel, um jegliche Gefäßverletzung zu vermeiden [81]. Es wird deutlich, dass auch bei den neuen minimalinvasiven Verfahren der Erhalt des Gefäßplexus für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens eine zentrale Rolle spielt.

Die Annahme einer hauptsächlich extraossären Blutversorgung des Metatarsalköpfchens unterstützen auch die Ergebnisse von Giannini et al., die die minimalinvasive Operation *SERI*<sup>14</sup> an 1000 Füßen durchführten [113]. Hierbei wird das Metatarsalköpfchen mit einer fast senkrechten Osteotomie vom Schaft getrennt und lediglich mit einem Kirschnerdraht refixiert (s. Kap. 1.3.5). Würde das Metatarsalköpfchen von dem intraossären Haverskanalsystem versorgt werden, wäre dieses bei der *SERI* komplett unterbrochen und die Blutversorgung mangelhaft. Doch zeigt die Studie von Giannini et al. eine vollständige Heilung ohne das Auftreten einer AVN. Sie begründeten dies ebenfalls mit der Vermutung der Kapselschonung und einem kompletten Verzicht auf die Weichteilmanipulation im Bereich des Metatarsalköpfchens [112, 113]. Dies heben nochmals die Ergebnisse von Minokawa et al. hervor, die Laser-Doppler-Untersuchung bei dem minimalinvasiven Verfahren nach Bösch durchführten. Prä- und postoperativ zeigte sich eine Änderungsrate des Blutflusses zum Metatarsalköpfchen von 0,0%, intraoperativ ließ sich bei lediglich drei Patienten eine Abnahme des Blutflusses von > 10% nachweisen. Auch in dieser Studie trat eine AVN nicht auf [227]. Es wird deutlich, dass die MIS den Blutfluss kaum bis gar nicht beeinträchtigt, was zurückzuführen ist auf ein Operationskonzept, welches die Gelenkkapsel und das plantare Weichgewebe in Gänze schont. Die Dopplerergebnisse verdeutlichen erneut, dass die eigentliche Osteotomie keinen Einfluss auf die Blutversorgung hat und damit kein Risiko für eine AVN darstellt.

Das Bösch-Verfahren zählt aufgrund des perkutanen Zugangswegs zwar zu den MIS, beinhaltet jedoch eine drastische Osteotomie mit bei naher kompletter Trennung des Metatarsalköpfchens vom Schaft. Eine intraossäre Versorgung des Knochens über die Havers-Kanäle wäre durch diese Operation nicht mehr gewährleistet und trotzdem konnte keine AVN nachgewiesen werden [28]. Autoren der MIS präzisieren dies durch die Annahme, dass die Osteotomie auf der subkapitalen Ebene durchgeführt wird. Weiter ist die Osteotomie der MIS proximaler als die Arterien, die für den Blutfluss zum Mittelfußkopf sorgen. Es handelt sich somit um extraartikuläre Verfahren mit weniger Komplikationen [34, 201, 227, 305, 350]. Des Weiteren beinhaltet die minimalinvasive distale Osteotomie weder eine mediale Kapsulotomie noch ein Adduktorenrelease. Dieses Verfahren konzentriert sich strikt auf den Erhalt des umgebenden Periosts an der Osteotomiestelle und ein minimales Weichteil-Release [8]. Der Erhalt des Periosts am Caput

<sup>13</sup>PeICO = percutaneous intra-articular chevron osteotomy.

<sup>14</sup>SERI = simple, effective, rapid, inexpensive

ist maßgeblich relevant für die Vitalität des Metatarsalköpfchens, da es die kleinen Äste des Gefäßnetzwerkes schützt und leitet. Dies erklärt die guten Ergebnisse der MIS ohne relevantes Auftreten von AVN.

Eine generelle Empfehlung zum minimalinvasiven Verfahren ist zum aktuellen Zeitpunkt schwierig, obwohl die Ergebnisse dieser Arbeit das Operationskonzept und die Risikoeinschätzung zur AVN unterstützen. Auch scheinen die Ergebnisse vergleichbar gut wie bei den klassisch offenen Verfahren zu sein [201]. Es werden allgemein gute Outcomes bei MIS beschrieben, doch herrscht auch Einigkeit über das Potenzial, vitale Strukturen zu verletzen, da eine direkte Sicht in den Operationssitus nicht möglich ist [218]. Auch wird das rein extraartikuläre Vorgehen bei den MIS in Hinblick auf die fehlende Korrektur der Weichteilbalance kritisiert [139]. Der Autor McGann ging 2019 sogar weiter und erläuterte, dass die aktuellen Raten der Osteotomie-Nonunionen, Malunionen, Rezidive und Osteonekrosen vergleichbar sind mit denen der traditionellen offenen Osteotomien [218]. Auch eine Studie aus dem Jahr 2007 wirft Fragen in Hinblick auf die Sicherheit der MIS auf. Neben den genannten Komplikationen gaben die Autoren eine Inzidenz der AVN von 8% nach einer perkutanen, distalen, metatarsalen Osteotomie an. In einem Operationsschritt beschrieben die Autoren, dass nach medialer Längsinzision das Periost scharf inzidiert und im Folgenden dorsal und plantar mit einem kleinen Elevatorium angehoben wurde [160]. In Anbetracht der Ergebnisse dieser Arbeit lässt sich mutmaßen, dass in diesem Operationsschritt eine zu grobe und weitreichende Ablösung des Periostes mit Lösung der notwendigen plantaren Gefäßäste erfolgte.

Die Bedeutung des extraossären anliegenden Gefäßplexus um das gesamte Metatarsalköpfchen wird nochmal durch die neuen minimalinvasiven Verfahren deutlich. Gleichzeitig ist es schwer, den relevantesten Anteil dieses Plexus zu benennen, da viele Autoren oftmals nur einen Teil des Plexus in ihren Untersuchungen bewerten. Es zeichnet sich jedoch eine hochrelevante Gefäßversorgung für das Caput des Os metatarsale I durch den plantaren Anteil des Plexus ab. Die A. nutricia mit der Blutversorgung über die Havers-Kanäle ist mutmaßlich zu vernachlässigen, was die geringe Haverskanaldichte am Caput unterstreicht. Interessant ist weiter, dass Proben in anatomischen Untersuchungen existieren, in denen die A. nutricia am Knochen nicht aufzufinden ist [83, 171, 176, 240, 241, 243, 274, 369]. In diesen Fällen ist von einer reinen arteriellen Versorgung über das Periost und kleinen Gefäßen auszugehen [49, 83, 240, 243, 304], was die Relevanz der A. nut. weiter abschwächt.

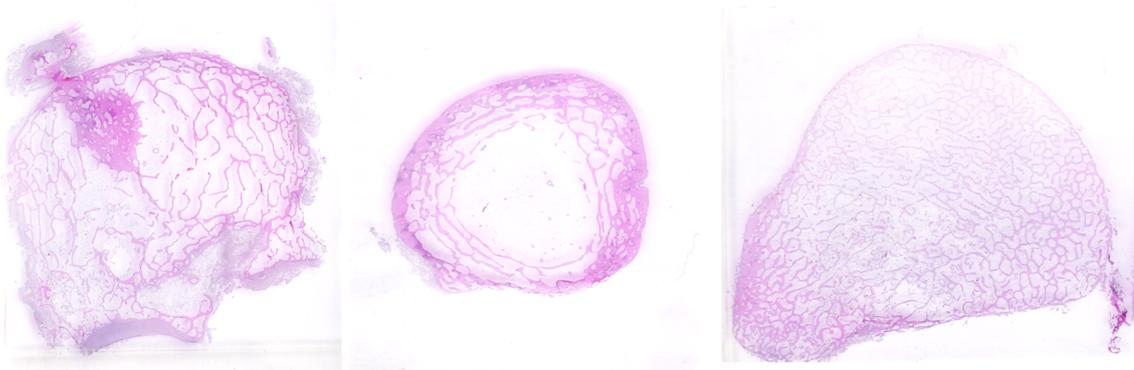
Einen derartigen Zusammenhang vermuteten bereits McGregor und Du Plessis 1969, die die kurzen Röhrenknochen in „*A Synopsis of surgical anatomy*“ umschrieben [219]. Darin hielten sie fest, dass nach Beendigung des Wachstums die Periostgefäße einen viel größeren Anteil an der Blutversorgung des Knochens einnehmen als die A. nutricia. Des Weiteren stellten sie die Hypothese auf, dass in Fällen, in denen das Nährstoffforamen fehlt, die Periostgefäße vollstän-

dig für die Blutversorgung des Knochens verantwortlich seien. Diese Hypothese passt zu den Ergebnissen dieser Arbeit, die die Hauptversorgung des Mittelfußköpfchens durch extraossäre Strukturen unterstreicht. Allgemein wird der A. nutricia eher eine entscheidende Rolle während des Knochenwachstums und der frühen Ossifikation des Knochens zugeschrieben [171, 232, 239]. In der Kindheit wird der Knochen intraossär zu 70-80 % durch die A. nut. versorgt, sodass bei einer Unterbrechung dieser eine medulläre Knochenischämie und Minderversorgung der Wachstumsfuge folgt [49]. Es wird deutlich, dass die A. nutricia in den frühen Phasen des Lebens von Relevanz ist und ihre Bedeutung für die Vaskularisation der Epiphysen abnimmt.

#### **4.5 Knochenstruktur**

Im Vergleich zum Schaft zeigt sich die Knochenstruktur von Caput und Basis des Os metatarsale I weniger dicht und kompakt. Vor allem im Bereich des Caputs wirkt die Knochenstruktur netzartig aufgetrieben. In Anbetracht der oben beschriebenen externen Gefäßversorgung, mittels eines Gefäßplexus, ergibt dies anatomisch funktionell Sinn. Die netzartige, wenig kompakte Struktur ermöglicht es kleinen Gefäßen des Plexus in das Caput des Os metatarsale I einzutreten. Dies ist elementar, da die Blutversorgung des Caputs von diesen externen Gefäßen hauptsächlich abhängig ist (siehe Kap. 4.4).

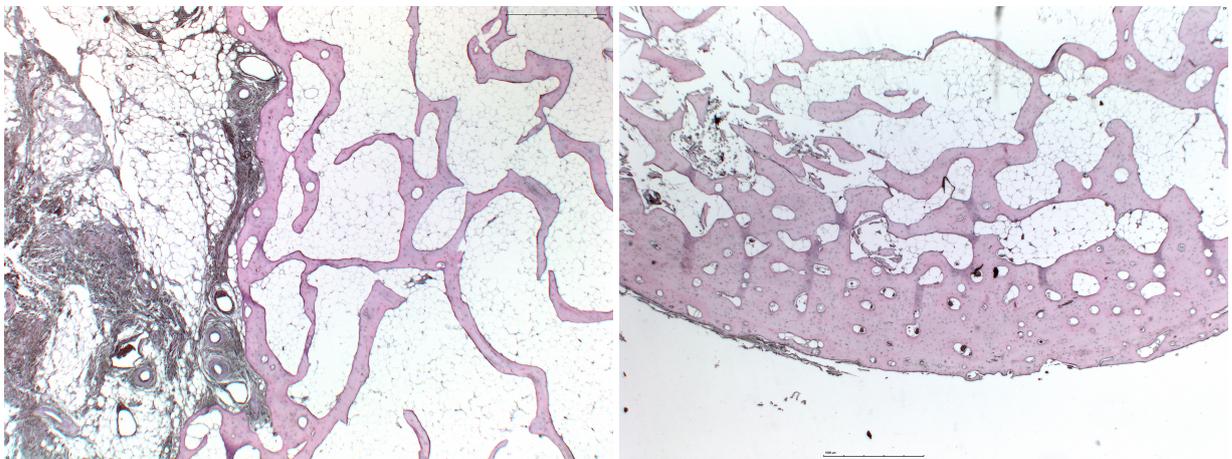
Die netzartige Knochenarchitektur am Caput deckt sich mit der Gegebenheit, dass spongiöse Knochenstruktur meistens in den Metaphysen langer Knochen vorzufinden ist [19, 45]. Dabei sind nach Bagi et al. zwei Typen der Spongiosa zu unterscheiden. Sie benennen die periphere Spongiosa, die sich aus plattenförmigen Trabekeln als Netz zusammensetzt und in die Richtung der Kraft des Körpergewichts orientiert ist. Die zentrale Spongiosa setzt sich hingegen in Bereichen mit wenig mechanischer Aktivität aus stäbchenartigen Trabekeln zusammen [17]. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die netzartige Spongiosastruktur vor allem im Bereich des Caputs, welches einen erheblichen Teil des Körpergewichtes trägt und unterstreichen die von Bagi et al. aufgestellte Unterteilung der Knochenstruktur [132, 264]. Ähnliche Gegebenheiten in der Knochenstruktur befinden sich auch in der Metaphyse des distalen Radius, die den größten Teil der Kraft bei Belastung überträgt [72]. Die subchondrale Knochenplatte wird auch hier als „gitterartig“ beschrieben und weist erstaunlicherweise keine Havers-Kanäle auf [19]. Die Dicke der Kortikalis variiert zudem je nach Region des Knochens. So zeigen die Metaphysen des Radius im Vergleich zur Diaphyse eine dünnere Schicht Kortikalis [19]. In dieser Arbeit wurden keine exakten Messungen der Kortikalis vorgenommen, doch ist rein visuell die Kortikalis von Basis und Caput des Os metatarsale I sehr viel schwächer im Vergleich zum Schaft (s. Abb. 4.2).



**Abbildung 4.2:** Histologie des Os metatarsale I in HE-Färbung mit erkennbarem Unterschied der Dicke der Kortikalis und Relation dieser zur Spongiosa; links: Caput, Mitte: Schaft, rechts: Basis (Quelle: eigene Darstellung).

Im Sinne dessen zeigten Maggio et al. 2021, dass bei steigender Anzahl der Osteone diese und die Havers-Kanäle im Umkehrschluss kleiner werden. Die Osteongröße wird durch den verfügbaren Platz im Knochengewebe begrenzt [208].

In Hinblick auf die Biomechanik des ersten Mittelfußknochens und die Belastung des Köpfchens beim Gehen lassen sich auf den Erkenntnissen dieser Arbeit zur Knochenarchitektur begründete Vermutungen aufstellen. Da der höchste Belastungspunkt beim Gehen auf das Köpfchen trifft, ist hier zugleich von einer hohen komprimierenden Wirkung auf den Weichteilmantel und die darin verlaufenden Nerven und Gefäße auszugehen. Die damit verbundenen Anforderungen an die anatomische Bauweise des Knochens sind eine hohe Druck- und Biegefestigkeit mit ausreichender arterieller Versorgung. Eine kompakte und dichte Baustruktur wäre hier von Nachteil, da diese einen stabilen und großflächigen Gegenpunkt zum Boden darstellen würde. Die Zugangsmöglichkeiten für kleine Gefäße wären zudem im dicht anliegenden harten Gewebe schwerer als bei dem in dieser Arbeit beschriebenen aufgelockerten Gewebe. Weiter ist es in einem solchen geflechtartigen Konstrukt möglich, mehrere weite Eintrittsstellen für Gefäße bereitzustellen, als bei einer derben scheibenartigen Architektur, wie in der Schaftregion. Die Weite oder Fläche der Eintrittspunkte für die Gefäße ist ebenfalls als günstig zu sehen, da der Winkel des Eintrittes der Gefäße in den Knochen sehr variable ist und somit an die mechanische Beanspruchung angepasst sein kann. Bei kompakten Lamellenknochen sind die Zugangsmöglichkeiten für die Gefäße kanalartig (Foramen nutricium) und ermöglichen auf diese Weise, als runde Eintrittsstellen am Knochen, hohe Scherkräfte auf das Gefäß. Dies geht einher mit dem damit



(a) Kortikalis am Caput.

(b) Kortikalis am Schaft.

**Abbildung 4.3:** Histologie des Os metatarsale I in HE-Färbung; a: Caput mit dünner Kortikalis und dicht anliegenden, durchtretenden Gefäßen; b: Schaft mit dichter, dicker Kortikalis und erkennbaren Havers-Kanälen (Quelle: eigene Darstellung).

verbundenen steileren Winkel mit dem das Gefäß in einen punktuellen Kanal eintritt, anstatt in eine weite lockere Knochenfläche. Diese Art von beschriebenen Geflechtknochen stellt eine optimale Bauweise für die mechanischen Anforderungen an das Caput des Os metatarsale I dar. Die Tatsache, dass der Schaft die kanalartige Bauweise mit einer A. nutricia und einem dazugehörigen Foramen aufweist, ist möglich, da der laterale Quer- und Längsbogen physiologisch *nicht* dem Boden aufliegt. Der Längsbogen des Fußes erlaubt somit einen großen Raum zum Eintritt von neurovaskulären Strukturen. Auf diese Weise kann der Eintrittswinkel der A. nut. steiler verlaufen. Gegenteilig verfügt das Caput über eine locker aufgebaute Kompakta, wodurch die kleinen Gefäße einfach ins Metatarsalköpfchen gelangen können (siehe Abb. 4.3). Da diese Äste des Gefäßplexus die hauptsächliche Versorgung zum Metatarsalköpfchen übernehmen, ist die beschriebene Knochenstruktur als sinnige und notwendige Voraussetzung zu bewerten.

#### 4.6 Laterales Release

Die hohe Relevanz des Weichteilmantels um das Caput des Os metatarsale I ist in dieser Arbeit deutlich geworden. Der Weichteilmantel inklusive Gelenkkapsel führt den notwendigen Gefäßplexus an das Metatarsalköpfchen heran, welches durch das alleinige intraossäre Haverskanalsystem nicht genügend mit Blut versorgt wird. Diese Gegebenheiten lassen auf das, in der Hallux-valgus-Chirurgie angewandte und oft diskutierte *laterale release* neue Rückschlüsse zu. Die Weichteilmanipulation, die hierbei am Caput erfolgt mit zum Teil scharfer Präparation und Lösung von

ligamentären Strukturen, stellt ein Risiko für den hier beschriebenen Gefäßplexus dar.

Die Kombination aus Chevron-Osteotomie und *lateralem release* ist gängig und wird in Hinblick auf das AVN-Risiko jedoch sehr divergent beschrieben (s. Kap. 1.3.6). Dass der Weichteileingriff risikoreich ist, wurde in der Literatur thematisiert und mit dem Risiko der avaskulären Nekrose oft in Verbindung gebracht. Das hohe Korrekturpotenzial des *lateralen release*, im Gegensatz zum allgemeinen geringen Risiko der avaskulären Nekrose, wird dabei oft als fürsprechendes Argument für diesen Weichteileingriff angebracht. So beschrieben DelVecchio et al., dass durch dieses Verfahren eine größere Korrektur der Hallux-valgus-Deformität erreicht werden kann. Sie nannten aber zugleich, dass das Risiko einer AVN durch diesen operativen Eingriff bis zu 40 % erhöht ist [81]. Dies unterstreicht die Bedeutung des Weichteilmantels für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens und zeigt zugleich die bereits vermutete untergeordnete Rolle der A. nutricia. Diese befindet sich nämlich weit proximal der für das *laterale release* relevanten anatomischen Strukturen.

Jones et al. untersuchten an Spaltheholzpräparaten die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens nach Chevron-Osteotomie mit und ohne *laterales release*. Während der Osteotomie ist der intraossäre Blutfluss zum Metatarsalköpfchen gestört. Bei einer zusätzlichen Zerstörung der wichtigen extraossären Blutversorgung kann es laut den Autoren zu einer Osteonekrose des Metatarsalköpfchens kommen. Sie skizzierten in ihrer Untersuchung ebenfalls ein deutliches Gefäßnetzwerk extraossär zum Metatarsalköpfchen hin, das sich sowohl proximal als auch distal zu der Osteotomiestelle befindet. Diese beiden Netzwerke werden nicht verletzt, wenn die Osteotomie korrekt angewendet wird. Zusätzlich besteht ein plantares sowie plantolaterales Netzwerk, welches den Blutfluss zum Köpfchen ermöglicht (s. Kap. 4.4). Allgemeine potenzielle Risiken der Osteotomie sind die Verletzung der ersten A. metatarsalis dorsalis bei Fehlplatzierung des Sägeblattes und inkorrekt Platziertung der Osteotomie innerhalb der Kapsel. Diese Fehler allein, oder in Kombination mit einer ausgedehnten Ablösung der Kapsel während des *laterales release*, kann laut der Autoren die Blutversorgung zum Kopf zerstören [158].

Neben der AVN als Komplikation wird durch einen exzessiven Weichteileingriff auch die Möglichkeit einer Überkorrektur und postoperativen Instabilität genannt [296]. Luria et al. fassten in ihrer Studie zusammen, dass der Weichteileingriff und damit einhergehender Kapsulotomie die Blutzufuhr zum Metatarsalköpfchen beeinträchtigt [201]. Interessanterweise konkludierten die Autoren, dass die Anwendung von distalen Osteotomien mit oder ohne (!) *laterales release* ohnehin das Risiko einer AVN mit sich bringt. Es wird durch diese Untersuchungen deutlich, dass sich das relevante Geschehen bezüglich der AVN auf die Kapsel und den plantaren Weichteilmantel konzentriert. Sie unterstrichen die hohe Relevanz der eintretenden Gefäße von plantar (Nebengefäß am plantaren Caput) und die Abhängigkeit des Metatarsalköpfchens vom extraossären Plexus (wenig Havers-Kanäle am Caput).

Um protektiv einer Schädigung dieses Plexus vorzubeugen, wurden in der Vergangenheit auch unterschiedliche Zugangswege für das *laterale Release* getestet. Beispielsweise beleuchteten Dayton et al. die potenziellen Vorteile eines medialen Zuganges und erwähnten hierbei, neben einem verbesserten Bewegungsumfang des MTP-Gelenks der Großzehe, postoperativ auch die gute Aufrechterhaltung der Durchblutung des Mittelfußkopfes [76]. Simons et al. stellten die Hypothese auf, dass ein transartikulärer Zugang zu einem vollständigeren Release führt und allgemein weniger Gewebeschäden verursacht [307]. Bei diesem Zugangsweg werden die Kapselgefäße nicht durchtrennt, was das Fehlen der AVN und die allgemein guten Resultate dieses Zugangsweges erklären könnte. Es wird deutlich, dass zur Optimierung des Zugangsweges die plantare Region geschont und nicht in Betracht gezogen wird.

Im Jahr 2012 wurde eine transartikuläre Weichteilfreisetzung durch eine einzige mediale Inzision beschrieben, wodurch auf eine weitere dorsale Inzision verzichtet werden konnte. Dabei sind die klinischen und radiologischen Ergebnisse im Vergleich zur dorsalen Inzision gleichwertig gut. Einige Autoren sehen durch Verbesserung des Zugangsweges die umfangreiche Weichteilentfernung begrenzt und damit das AVN-Risiko reduziert [194, 307, 319]. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich die Bedeutung eines dorsalen Zuganges allgemein jedoch relativieren, da an dieser Stelle keine für die Gefäßversorgung relevanten Strukturen verlaufen. Wie bereits beschrieben, ist der plantare Blutfluss des Metatarsalköpfchens von Bedeutung. Vermutlich wäre es auch bei Anwendung des dorsalen Zuganges zu keinem erhöhten Risiko der AVN gekommen. In Bezug auf den transartikulären Zugang ist zu erwähnen, dass dieser Zugangsweg sehr nah am Caput entlang verläuft und eine Dehnung der Kapsel samt wichtiger Gefäßen denkbar wäre. Auch wenn in dieser Studie keine AVN auftrat, so sollte ein transartikulärer Zugang nicht bevorzugt werden. Das Risiko einer Fehlinzision in die Kapsel und damit Verletzung der Gefäße ist bei dieser Technik denkbar. Diesbezüglich forderte der Autor Simons bereits 2015 weitere klinische Studien, da er ebenfalls von einem erhöhten Risiko der AVN während der Lösung der lateralen Kapsel ausgeht [307].

Das *laterale release* kann insgesamt als eindeutiger Risikofaktor vermutet werden, da es den elementaren Gefäßplexus schädigen kann. Welche Konsequenz sich daraus für die Anwendung im klinischen Alltag ergibt, ist schwer zu formulieren. Grund dafür ist auch die Existenz mehrerer Untersuchungen, die das *laterale release* als vollständig sichere Methode einordnen.

In ihrem Review fassten Easley et al. 2007 zusammen, dass eine Kombination aus distaler Chevron-Osteotomie, *lateralem release* und Adduktorsehnenlösung nicht mit einem erhöhten Risiko der Osteonekrose des Metatarsalköpfchens einhergeht [88]. Bei den Proben, die eine Chevron-Osteotomie inklusive eines LatR. erhielten, wurden die lateralen kopfversorgenden Gefäße nicht verletzt [158]. Zudem betonten Jones et al., dass bei 2089 Patienten aus 11 klinischen Studien keine AVN trotz des LatR. nachgewiesen werden konnte. Die Autoren konkludierten,

dass wenn die Chevron-Osteotomie richtig angewendet wird, die blutversorgenden Gefäße erhalten bleiben, unabhängig davon, ob ein LatR. durchgeführt wird oder nicht. Wichtig während der Operation sei die Schonung des Kapselansatzes und der perivaskulären Gefäße (plantolateral und dorsolaterales Gefäßnetzwerk), um den Blutfluss zum Metatarsalköpfchen zu erhalten [158].

Die beschriebenen Gefäßnetzwerke um die Kapsel geben durch das Kapselgewebe kleine Perforansgefäße ab. Daher sollte ein exzessives Ablösen der Weichteile, im Schritt der Freilegung zur Osteotomie oder während der Verschiebung, vermieden werden. Dieses sei laut der Autoren der relevanteste Schritt in der Begründung einer Osteonekrose. Die Osteotomie sollte proximal zur Gelenkkapsel, aber distal der A. nutricia erfolgen [158]. Diese von Jones et al. formulierte Empfehlung entspricht der Kernaussage dieser Arbeit und macht insgesamt den Weichteilmantel am Caput zu der relevanten Struktur in Hinblick auf eine AVN. Diese Ergebnisse stellen die Relevanz der Sicherung des Gefäßplexus dar. Die Kenntnis dieses Plexus und die sichere Anwendung des LatR., welches vor allem die plantare Kapsel schont, macht das Auftreten einer avaskulären Nekrose sehr unwahrscheinlich. Ähnlich erklärten Thomas et al. bereits 1994 nach einer radiologischen Untersuchung von 88 Füßen, operiert mittels Chevron-Osteotomie und *lateral release*, dass wenn die Blutversorgung zum Köpfchen und zur Kapsel bewahrt wird, diese Op-Technik unwahrscheinlich Ursache einer klinisch nennenswerten AVN des Metatarsalköpfchens sein kann [332]. Interessanterweise tritt in den neuen MIS die AVN ebenfalls auf, obwohl hier auf ein *laterales release* verzichtet wird [96, 160]. Die Rolle des LatR. für eine AVN wird durch die Ergebnisse aus den neuen minimalinvasiven Verfahren abgeschwächt, da es hier nicht zur Anwendung kommt. Spannend ist weiter, dass das Risiko einer avaskulären Nekrose wohl auch nicht von altersbedingten Veränderungen in der Knochenstruktur abhängig zu sein scheint. In einer Studie mit HV-Korrektur an über 60-Jährigen zeigte sich keine AVN, trotz poröser Knochenstruktur. Es gab keine Fälle von Refrakturen oder avaskulären Nekrosen (AVN). Die Autoren postulierten, dass die distale Chevron-Osteotomie mit lateralem Release bei Patienten im Alter von 60 Jahren sicher und das Risiko beim LatR. auf die Durchblutung des Knochens vom Alter unabhängig ist. [299].

Einschränkend hinzuzufügen ist, dass in vollem Umfang betrachtet, die genaue Definition des distalen Weichteileingriffes sehr uneinheitlich ist [295]. So wurde in einigen Studien die Gelenkkapsel bspw. vollständig eröffnet und in anderen wiederum diese nur sparsam perforiert. Ähnlich verhält es sich mit der Durchtrennung und der Kürzung im Bereich des Sesamoidkomplexes. Daher ist in Bezug auf das AVN-Risiko eine generelle Aussage über „den Weichteileingriff“ oder das *laterale release* schwierig zu treffen und wurde in der älteren Literatur schnell verallgemeinert und zusammengefasst. Zu empfehlen ist daher, stets die jeweiligen einzelnen Operationsschritte im Hinblick auf das AVN-Risiko zu betrachten.

Insgesamt ist trotz des hohen Korrekturpotenzials und oftmals der Notwendigkeit des *laterale*

*release* die Anwendung dieses in Frage zu stellen. Mann berichtete von einem guten Outcome nach Chevron-Osteotomie auch ohne *lateralem release* [214]. Im Jahre 2017 verglichen Grle et al. die Patientenzufriedenheit und den HV-Winkel nach Chevron-Osteotomie, mit und ohne *lateralem release*. Beide Gruppen wiesen einen verbesserten HV-Winkel auf, ohne signifikante postoperative Unterschiede. Zudem birgt das kombinierte Verfahren eine allgemein erhöhte Komplikationsrate für eingeschränkte Beweglichkeit des ersten MTP-Gelenks, kosmetische Probleme sowie das Risiko einer Neuritis der dorsalen und plantaren Äste des Nervus plantaris lateralis. In einer Vergleichsstudie von Lee et al. schwächten diese den Effekt des LatR. ebenfalls ab. So sei dieser Weichteileingriff bei leichten oder mittelschweren Hallux-valgus-Deformitäten möglicherweise in Relation zu den Risiken des verminderten Bewegungsumfanges des ersten Metatarsophalangealgelenks, einer Neuritis des dorsalen oder plantaren lateralen Digitalnervs und einer kosmetisch unbefriedigenden dorsalen Narbe, nicht sinnig [200]. Auch Lee et al. konkludierten, dass eine laterale Weichteilentlastung bei leichten oder moderaten Hallux-valgus-Deformitäten möglicherweise nicht notwendig ist, vor allem unter dem Aspekt, dass die Adduktorsehnedurchtrennung keinen wirklichen Effekt habe [153, 186, 280]. Zusätzlich wird kritisch diskutiert, ob eine Ablösung des M. adductor hallucis vom lateralen Sesambein sinnvoll sei bei dem erhöhten Risiko einer Sesambeinnekrose als Folge [376].

In Anbetracht der Ergebnisse dieser Arbeit ist die Notwendigkeit und das Prinzip von Risiko und Nutzen des *lateralen release* in Frage zu stellen. Der Eingriff in das Weichgewebe und die Lösung der Kapsel sind als riskant für die Blutversorgung des Metatarsalköpfchens einzustufen. Abschließend sprechen sich jedoch viele Autoren aufgrund einer optimierten Sesambeinposition und einer besseren Patientenzufriedenheit für ein LatR. aus [121, 296]. Auch in einer Leitlinie zur Therapie des HV betont der Autor Waizy, dass die chirurgische Behandlung sowohl die knöcherne Deformität als auch die periartikulären Weichteilstrukturen umfasst [356].

#### 4.7 Methodenkritik und Limitationen

Der Anspruch dieser Arbeit lag darin, die extra- und intraossäre Blutversorgung des Os metatarsale I anatomisch präzise und für den klinischen Alltag anwendbar zu beschreiben. Dabei gestaltete sich die Darstellung des im Knochen verlaufenden vaskulären Systems durch das harte Knochenmaterial und die langen Aufbereitungsprozesse aufwendig. Dies ist in der Literatur ein oft genanntes und bekanntes Problem [253, 277]. Durch die lange Entkalkung des Materials, die den Knochen erst histologisch aufbereitbar macht, ist ein begleitender Schaden an den Osteozyten und den Osteonen nicht zu vermeiden gewesen. Die damit einhergehende eindeutige Definition eines Havers-Kanals ist erschwert. Die Auswertung erfolgte anhand des Bildbearbeitungsprogramms „*imageJ*“ und birgt in diesem Sinne das Risiko einer Messunsicherheit der

Havers-Kanäle. Es ist zu diskutieren, ab welchem Radius von einem Havers-Kanal oder einem Knochen trabekel ausgegangen werden kann. Zudem muss bedacht werden, dass die Größe von Fläche und Radius durch den histologischen Schnitt bestimmt und verzerrt wird [259]. In der Literatur wird weiter postuliert, dass die Havers-Kanäle in einer Richtung ungefähr parallel zur Längsachse orientiert sind, sodass bei Querschnitten die Kanäle nahezu senkrecht getroffen werden [59, 231, 259, 325]. In der Theorie besteht das Risiko, dass in der gemessenen Haverskanalanzahl ein Knochen trabekel fälschlicherweise mitgezählt wurde. Dabei ist ebenfalls der beeinflussende Faktor des Anschnitts einzurechnen.

Um dem entgegenzuwirken, wurde im Anschluss an die Partikelmessung mittels „*imageJ*“ händisch eine Korrektur vorgenommen. Der zu messende Bereich von einem  $1\text{ mm}^2$  wurde dabei auf einen Bereich gelegt, in dem visuell Havers-Kanäle auszumachen waren. Es wurde sich an dem lamellenartigen Aufbau der Osteone und den darin befindlichen Osteozyten gehalten. Die rundliche Aussparung der Knochenstruktur wurde dann als Havers-Kanal gewertet. Ähnliche Problematiken beschrieben Miszkiewicz et al., die eine sehr ähnliche Methodik zur Messung der Havers-Kanäle im Jahr 2021 heranzogen [229]. Eine Einteilung der Haverskanalform (konisch, zylindrisch, elliptisch, hyperbolisch), wie in anderen Untersuchungen [57, 259], ist aufgrund der zweidimensionalen Darstellung in dieser Arbeit nicht möglich. Weiter wurde das Plugin *BoneJ* für „*imageJ*“ nicht angewendet. Dadurch kann die Gesamtosteondichte nicht berücksichtigt und mit der Haverskanaldichte in Relation gesetzt werden [84, 326]. In der Forschung der Mikroarchitektur von Knochen verwenden zudem einige Autoren exakt definierte Begriffe der histologischen Strukturen und ihrer Eigenschaften (bspw. *intact osteon density*, *fragmentary osteon density*, *osteon area*, *haversian canal diameter*) [228, 237, 315]. Diese Arbeit verwendet diese Parameter nicht und ist daher nur eingeschränkt vergleichbar mit diesen Studien.

Seitens der Körperspenderinnen und Körperspender konnten keine exakten Informationen zu Vordiagnosen, die einen bedeutenden Einfluss auf die Knochensubstanz oder den Gefäßstatus haben (Osteoporose, Diabetes mellitus, Adipositas, periphere arterielle Verschlusskrankheit, Dyslipidämie, rheumatoide Arthritis, Voroperationen) erfasst werden. Die Pathologie der Osteoporose, mit einem reduzierten Mineralsalzgehalt der Knochen, kann durch die fehlenden Hintergrundinformationen nicht in Relation mit der gemessenen Knochensubstanz gebracht werden. Die Ergebnisse zur vorhandenen Knochenfläche, die für die Durchblutung genutzt wird, könnten dadurch ebenfalls beeinflusst werden. In Hinblick auf die Pathologie der avaskulären Nekrose sind die o. g. Vorerkrankungen ebenfalls von Bedeutung. Folgt man der Aussage von Louis Samuel Barouk, könnten diese einen Einfluss auf die Entstehung der avaskulären Nekrose haben. Er beschreibt, dass eine AVN des Metatarsalköpfchens beispielsweise vermehrt bei schwerer arthritischer Hallux-valgus-Korrektur auftrat [22]. Auch wird in der Literatur von dem höchsten AVN-Risiko bei systemischem Lupus erythematodes, im Vergleich zu allen anderen rheuma-

toiden Erkrankungen, gesprochen [189, 313], wodurch die Relevanz der Vorerkrankungen noch einmal deutlich wird. Nennenswert zudem, bezüglich des Alters und der damit einhergehenden Komorbiditäten, ist die Aussage von Yassin et al., dass Patienten im höheren Alter und mit Gefäßerkrankungen zu einer perkutanen Operation geraten werden sollte [371]. Im Umkehrschluss impliziert diese Aussage, dass die MIS sich weniger negativ auf den Blutfluss auswirken als die offenen Methoden. Auch ist in Bezug auf die Knochenstruktur und die Verzweigung der Havers-Kanäle, das Alter, das Geschlecht, der Allgemeinzustand und der Lebensstil in der Literatur als relevant bezeichnet worden, was in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte [39, 58, 216, 273].

In Bezug auf die Auswertung und Interpretation der Vater-Pacini-Körperchen an der A. nut. ist zudem einschränkend zu nennen, dass die Beschreibung dieser nicht primäres Ziel dieser Arbeit war. Der Fund der Mechanorezeptoren ist als eine Art „Zufallsbefund“ zu werten. Ihr Vorkommen in knapp der Hälfte der Proben ist damit eine rein deskriptive Beschreibung dieser zufälligen Präparation. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass VPK nicht auch in der anderen Hälfte der Proben vorgekommen sind, diese nur nicht zielgerichtet präpariert wurden. Eine gezielte Untersuchung zu VPK an Aa. nutriciae ist somit erforderlich. Der Zusammenhang dieser mit einer avaskulären Nekrose, die in dieser Arbeit in den Körperspenden nicht auftrat, ist ebenfalls gesondert zu untersuchen. Weiter sind die hier nachgewiesenen „Lamellenkörperchen“ als eigene neue Entität zu diskutieren. Durch den lamellenartigen Aufbau und den zentralen Kern haben sie eine große morphologische Ähnlichkeit zu Vater-Pacini-Körperchen. Doch imponieren diese im Vergleich zu VPK eher entrundet und mit sternförmigen Ausziehungen. Damit könnten sie auch insgesamt zerstörten Vater-Pacini-Körperchen entsprechen, die durch den Aufarbeitungsprozess ihre klassische runde Form verloren haben. Für eine genaue Definition und Abgrenzung zwischen den genannten Körperchen sind weitere Arbeiten notwendig.

Unabhängig von der morphologischen Einteilung der gefundenen Lamellenkörperchen muss erwähnt werden, dass eine immunhistochemische Färbung dieser nicht gelungen ist. Es wurde der „*Anti-Tyrosine-Hydroxylase Antikörper*“ (TH) und das „*Myelin Basic Protein*“ (MBP) verwendet. TH als Marker für dopaminerge und noradrenerge Neuronen ist laut Hersteller nicht für Paraffinschnitte geeignet und erklärt womöglich dadurch das ausbleibende Farbergebnis. Die ausbleibende Reaktion der Lamellenkörperchen auf das MBP kann durch den Entwässerungsprozess und/oder auf einen Anwenderfehler zurückgeführt werden. Die Identifikation der VPK erfolgte demnach rein auf morphologisch visueller Basis. Eine Untersuchung an frischem Gewebe könnte hierbei nützlich sein.

Die Foramina nutricia wurden am Knochen ex vivo erfasst und anhand von Fotografien gemessen. Hierbei wurde die digitale Messung an den distalen und proximalen Knochenpunkten gesetzt. Diese entsprechen dabei nicht vollständig den Gelenkspalten des Metatarsophalangeal-

oder Tarsometatarsalgelenks in vivo, wodurch eine gewisse Messunsicherheit besteht. In der Literatur sind zudem Messungen des Foramen nut. mittels Röntgen- und CT-Untersuchung erfolgt, die eine genauere Darstellung in vivo erlauben. Darüber hinaus ist die hier vorgenommene Unterscheidung in ein erstes und zweites Foramen kritisch zu behandeln. Vor allem bei der Charakterisierung eines plantaren Foramens, als zweites Foramen nutricium, muss hier differentialdiagnostisch an den Eintritt eines prominenten Gefäßastes des Gefäßplexus gedacht werden. So könnte hinter einem gezählten zweiten Foramen nut. eigentlich nur ein größerer plantarer Gefäßeintritt stehen. Die rein makroskopische Unterscheidung ist schwierig und fordert eine genaue Definition von Charakteristiken eines Foramen nutriciums.

Eine weitere Frage der Definition stellt die Einteilung des Os metatarsale I in Caput, Corpus und Basis dar. Es bestehen hierbei keine klar festgelegten Grenzen in Zentimetern, sodass eine orientierende Einteilung der Knochen vorgenommen wurde. Dementsprechend kann ein weit proximal geschnittenes Stück des Caput bereits einem sehr distalen Bereich des Schaftes entsprechen. Die Übergänge sind im Knochen fließend und erschweren definitive Aussagen.

### **Ausblick**

Nach den Ergebnissen dieser Arbeit ist zu empfehlen, dass die Gelenkkapsel des MTP-Gelenks so weit wie möglich intakt gehalten werden sollte. Von einem exzessiven Ablösen des Weichgewebes, wie der Adduktorsehne oder der sesamoidalen Bänder, sollte abgesehen werden, um das Gefäßnetzwerk des Metatarsalköpfchens nicht zu verletzen. Die jüngeren minimalinvasiven Verfahren verzichten genau auf diese Operationsschritte und rechtfertigen ihren vermehrten Einsatz. Weiter kann sich der Empfehlung angeschlossen werden, dass vor der Osteotomie der Chirurg sicherstellen sollte, dass die Osteotomieschenkel außerhalb der Kapselansätze austreten [286], um den Gefäßplexus zu schonen.

In Bezug auf die doch sehr divergent beschriebene Prävalenz der AVN lässt sich die Vermutung äußern, dass das Ablösen mittels Weichteiltechniken von den Operateuren unterschiedlich exzessiv betrieben wurde. So könnte sich bei einem Patienten durch ein LatR. das mediale Gefäßnetzwerk komplett ablösen und eine AVN entstehen lassen, während bei einem anderen dieses eher plantar dominant ist und bei gleichem Operationsprinzip keine AVN entsteht. Individuelle Pathologien, die auf den physiologischen Gefäßstatus wirken, und somit das Risiko einer AVN noch steigern könnten, sollten isoliert untersucht werden. Die Existenz von Mechanorezeptoren

in der Nähe der A. nutricia ist in der Literatur nicht beschrieben und stellt im Hinblick auf eine mögliche Regulation des Blutflusses und die Existenz eines Reflexbogens einen neu zu untersuchenden Bereich dar. Auch der Zusammenhang zwischen biomechanischer Beanspruchung, deren propriozeptive Wahrnehmung und Konsequenzen für die Knochenstruktur, stellt ein komplexes und vielversprechendes Gebiet in der Knochenforschung dar.

Im Bereich der Mikrostruktur und der Blutversorgung von Knochen allgemein wird aktuell viel geforscht. Die dreidimensionale Darstellung mittels Mikro-Computertomografie, Fluoreszenzmikroskopie, Zweiphotonenmikroskopie, Elektronenmikroskopie oder digitale Bildrekonstruktion erlaubt eine räumliche Vorstellung über die intraossären Prozesse und ist mittlerweile der Standard in der Knochenforschung. So publizierten Grüneboom et al. 2019 eine Arbeit über *transkortikale* Gefäße (TCVs), die ein neues Modell der Vaskularisation von Knochen beschreiben [10, 122].

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Ansicht des Os metatarsale I von medial. Einteilung in drei Regionen: Caput (1), Corpus (2) und Basis (3) (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler). . . . .	3
1.2	Schematische sagittale Ansicht des Os metatarsale I mit den angrenzenden Gelenkflächen (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	4
1.3	Anatomie des dorsalen Fußes. Präparation zur Darstellung der dorsalen Fußarterien. Vorherige Färbung der Arterien mittels Latex-Injektion an einer nach <i>Thiel</i> fixierten Körperspende (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	6
1.4	Anatomie des plantaren Fußes. Präparation zur Darstellung der metatarsalen Arterien. Vorherige Färbung der Arterien mittels Latex-Injektion an einer nach <i>Thiel</i> fixierten Körperspende (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	8
1.5	Ansicht auf das Os metatarsale I von lateral. Oben: Zeichnung der A. nutricia (rot) im präparierten, abgelösten Weichteilmantel. Unten: Foramen nutricium (Kreis) nach Entfernung des Weichteilmantels (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler). . . . .	9
1.6	Histologische Darstellung von Knochengewebe des Os metatarsale I nach Entkalkung und HE-Färbung; erkennbare dichte Kompakta mit darunterliegender Spongiosa. A: Art Geflechtknochen, B: typischer Lamellenknochen (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	12
1.7	A: Knochenhistologie in HE-Färbung; B: eingefügte Markierungen; schwarz: Osteon; grün: Volkmann-Kanal; gelb: Havers-Kanal (Quelle: eigene Darstellung). . .	14
1.8	Schematische Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchen im Längsschnitt mit zentralem Axon. . . . .	15
1.9	Schematische Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchen im Querschnitt mit umgebender Bindegewebskapsel. . . . .	17

1.10	Reizschwelle und Reizantwort eines Vater-Pacini-Körperchens. A: Reiz trifft auf die Querachse, B: Reiz trifft auf die Längsachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Il'inskiĭ et al.</i> [144]). . . . .	18
1.11	Stimulation zwischen Gefäß und Vater-Pacini-Körperchen; A: Reiz trifft auf Längsachse, B: Reiz trifft auf Querachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Il'inskiĭ et al.</i> [144]). . . . .	20
1.12	Schnittführung der Osteotomie bei Chevron- und Scarf-Osteotomie am Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Engelhardt et al.</i> [92]). . .	26
1.13	Operationsschritte des lateralen Release mit medialem Zugangsweg (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Engelhardt et al.</i> [92]). . . . .	27
1.14	Schematische Darstellung des minimalinvasiven Verfahrens nach <i>Bösch</i> am Os metatarsale I. Nach der subcapitalen Osteotomie (gestrichelte Linie) wird das Fragment mit einem Kirschnerdraht in Position gehalten (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Bösch</i> [33]). . . . .	29
2.1	Übersicht der Arbeitsschritte. Obere Reihe: Amputation des Vorfußes nach <i>Lisfranc</i> (gestrichelte rote Linie) mit anschließender Präparation der A. nutricia (rot) und Heraussägen von drei Knochenproben (Caput, Foramen, Basis). Mittlere Reihe: Proben der Arterie und Knochen jeweils in Paraffinblöcken. Untere Reihe: nach Schnitt am Mikrotom Proben der Arterie und Knochen auf Objektträgern (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler). . . .	39
2.2	Teilschritte der makroskopischen Präparation am Vorfuß zur Amputation nach <i>Lisfranc</i> ; a: Freilegung des TMT-Gelenkspaltes mittels Pinzette; b: Schnittführung zur vollständigen Amputation des Vorfußes. . . . .	40
2.3	Fotografie des Os metatarsale I nach Entnahme; oben: Endergebnis der Knochenpräparation; unten: Ansicht auf die laterale Fläche des Os metatarsale I mit Markierung des Foramen nutricium (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	41
2.4	Einzelschritte der Bildbearbeitung mit <i>imageJ</i> . . . . .	51
2.5	Auswertung anhand von definierten Regionen des Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler.) . . . . .	52
3.1	Anzahl der Foramina nutricia am Os metatarsale I. . . . .	57
3.2	Lokalisation Hauptgefäß in der Ap- und Ccp-Lokalisation. . . . .	58
3.3	Definierten Regionen des Os metatarsale I (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler.) . . . . .	58
3.4	Lokalisation des Hauptgefäßes bei Kombination beider Ebenen. . . . .	59
3.5	Lokalisation des Nebengefäßes am Os metatarsale I. . . . .	60

3.6	Lokalisation Nebengefäß bei Kombination beider Ebenen. . . . .	61
3.7	Häufigste Lokalisation der Foramina nutricia beispielhaft an einer Probe. Ansicht von lateral (links) und plantar (rechts). . . . .	62
3.8	Lokalisation des Hauptgefäßes ohne Nebengefäß in Ap- und Ccp-Lokalisation. . .	62
3.9	Lokalisation Hauptgefäß ohne Nebengefäß bei Kombination beider Ebenen. . . .	63
3.10	Heatmap der Lokalisation des Foramen nutricium; oben: Nebengefäß, Mitte: Hauptgefäß ohne Nebengefäß, unten: nur Hauptgefäß (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler). . . . .	64
3.11	Häufigkeitsverteilung des Foramen nutricium innerhalb high-risk-Region (Quelle: eigene Darstellung in Kooperation mit Frau Opfermann-Rüngeler). . . . .	65
3.12	Gefäßprobe in Elastika-van-Gieson-Färbung. Zentral erkennbare Arteria nutricia mit Färbung der Membrana elastica interna und begleitende Vene umgeben von einer Bindegewebsseide. Links erkennbares Vater-Pacini-Körperchen (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	66
3.13	Gefäßprobe in Azan-Färbung. Links im Präparat Arteria nutricia und begleitende Vene sowie kleinere Gefäße und periphere Nerven erkennbar. Außerhalb der Bindegewebsseide Darstellung eines Vater-Pacini-Körperchens am unteren Bildrand (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	67
3.14	Darstellung verschiedener Propriozeptoren am Os metatarsale I in Azan-, HE- und Elastika-van-Gieson-Färbung (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	68
3.15	Knochenanteil in einem Quadratmillimeter. . . . .	69
3.16	Anzahl der Havers-Kanäle in einem Quadratmillimeter. . . . .	71
3.17	Haverskanalfläche in einem Quadratmillimeter. . . . .	72
3.18	Haverskanalfläche innerhalb der Knochenfläche eines Quadratmillimeters. . . . .	73
4.1	Stimulation zwischen Gefäß und Vater-Pacini-Körperchen; A: Reiz trifft auf Längsachse, B: Reiz trifft auf Querachse (Quelle: eigene Darstellung modifiziert nach <i>Il'inskiĭ et al.</i> [144]). . . . .	84
4.2	Histologie des Os metatarsale I in HE-Färbung mit erkennbarem Unterschied der Dicke der Kortikalis und Relation dieser zur Spongiosa; links: Caput, Mitte: Schaft, rechts: Basis (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	100
4.3	Histologie des Os metatarsale I in HE-Färbung; a: Caput mit dünner Kortikalis und dicht anliegenden, durchtretenden Gefäßen; b: Schaft mit dichter, dicker Kortikalis und erkennbaren Havers-Kanälen (Quelle: eigene Darstellung). . . . .	101

# Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht Operationen . . . . .	24
1.2	Komplikationen nach retrokapitalen Korrekturosteotomien . . . . .	31
2.1	Liste Chemikalien, Geräte und Materialien . . . . .	37
2.2	Betrachtete Variablen . . . . .	49
2.3	Übersicht Präparate für Messung Havers-Kanäle . . . . .	49
2.4	Rechnung des jeweiligen Faktors. . . . .	53
2.5	Effektstärke . . . . .	54
3.1	Ausgeschlossene Kombinationen des Hauptgefäßes. . . . .	59

# Literaturverzeichnis

- [1] Ahmed E, Mohamed AH and Hany S: “Early results of distal metatarsal osteotomy through minimally invasive approach for mild-to-moderate hallux valgus”. *Acta Orthopædica Belgica* 76:526–535 (2010)
- [2] Ahn JY, Lee HS, Chun H, Kim JS, Seo DK, Choi YR and Kim SW: “Comparison of open lateral release and transarticular lateral release in distal chevron metatarsal osteotomy for hallux valgus correction”. *International orthopaedics* 37(9):1781–1787 (2013)
- [3] Al-Motabagani M: “The arterial architecture of the human femoral diaphysis”. *J Anat Soc India* 51(1):27–31 (2002)
- [4] Alvarez R, Haddad RJ, Gould N and Trevino S: “The simple bunion: anatomy at the metatarsophalangeal joint of the great toe”. *Foot & ankle* 4(5):229–240 (1984)
- [5] Anamika K, Murlimanju B, Divya P, Prabhu LV, Saralaya V, Rai AR and Joy T: “Morphology of Nutrient Foramina in Human Metatarsals and Their Clinical Importance”. *Medicine & Health* 10(1):37–47 (2015)
- [6] Anderson HC: “Matrix vesicles and calcification”. *Current rheumatology reports* 5(3):222–226 (2003)
- [7] Anetai H, Kinose S, Sakamoto R, Onodera R, Kato K, Kawasaki Y, Miyaki T, Kudoh H, Sakai T and Ichimura K: “Anatomic characterization of the tibial and fibular nutrient arteries in humans”. *Anatomical Science International* 96(3):378–385 (2021)
- [8] Angthong C, Yoshimura I, Kanazawa K, Hagio T, Ida T and Naito M: “Minimally invasive distal linear metatarsal osteotomy for correction of hallux valgus: a preliminary study of clinical outcome and analytical radiographic results via a mapping system”. *Archives of orthopaedic and trauma surgery* 133(3):321–331 (2013)
- [9] Asaki S, Sekikawa M and Kim Y: “Sensory innervation of temporomandibular joint disk”. *Journal of Orthopaedic Surgery* 14(1):3–8 (2006)

- 
- [10] Asghar A, Kumar A, Kant Narayan R and Naaz S: “Is the cortical capillary renamed as the transcortical vessel in diaphyseal vascularity?” *The Anatomical Record* 303(11):2774–2784 (2020)
- [11] Ashique A, Hart L, Thomas C, Clement J, Pivonka P, Carter Y, Mousseau D and Cooper D: “Lacunar-canalicular network in femoral cortical bone is reduced in aged women and is predominantly due to a loss of canalicular porosity”. *Bone reports* 7:9–16 (2017)
- [12] Augoyard R, Largey A, Munoz MA and Canovas F: “Efficacy of first metatarsophalangeal joint lateral release in hallux valgus surgery”. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 99(4):425–431 (2013)
- [13] Aumüller G, Aust G, Engele J and Kirsch J: “Duale Reihe Anatomie. 5., korrigierte Auflage” (2020)
- [14] Austin DW and Leventen EO: “A New Osteotomy for Hallux Valgus: A Horizontally Directed “V” Displacement Osteotomy of the Metatarsal Head for Hallux Valgus and Primus Varus”. *Clinical Orthopaedics and Related Research*® 157:25–30 (1981)
- [15] Báča V, Kachlík D, Horák Z and Stingl J: “The course of osteons in the compact bone of the human proximal femur with clinical and biomechanical significance”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 29(3):201–207 (2007)
- [16] Badwey TM, Dutkowsky JP, Graves SC and Richardson EG: “An anatomical basis for the degree of displacement of the distal chevron osteotomy in the treatment of hallux valgus”. *Foot & ankle international* 18(4):213–215 (1997)
- [17] Bagi C, Wilkie D, Georgelos K, Williams D and Bertolini D: “Morphological and structural characteristics of the proximal femur in human and rat”. *Bone* 21(3):261–267 (1997)
- [18] Bai LB, Lee KB, Seo CY, Song EK and Yoon TR: “Distal chevron osteotomy with distal soft tissue procedure for moderate to severe hallux valgus deformity”. *Foot & ankle international* 31(8):683–688 (2010)
- [19] Bain GI, MacLean SBM, McNaughton T and Williams R: “Microstructure of the distal radius and its relevance to distal radius fractures”. *Journal of Wrist Surgery* 6(04):307–315 (2017)
- [20] Baraliakos X: *Komplikationen in Orthopädie und Unfallchirurgie: vermeiden, erkennen, behandeln; 179 Tabellen*. Georg Thieme Verlag (2010)

- [21] Barnett C: "The normal orientation of the human hallux and the effect of footwear". *Journal of anatomy* 96(Pt 4):489 (1962)
- [22] Barouk LS: *Forefoot reconstruction*, volume 3. Springer Science & Business Media (2006)
- [23] Bauer T, de Lavigne C, Biau D, De Prado M, Isham S and Laffenêtre O: "Percutaneous hallux valgus surgery: a prospective multicenter study of 189 cases". *Orthopedic Clinics of North America* 40(4):505–514 (2009)
- [24] Beckering Jr R and Titus J: "Pacinian corpuscles in the adventitia of human femoral-popliteal vessels". *Archives of pathology* 88(2):204 (1969)
- [25] Bell J, Bolanowski S and Holmes MH: "The structure and function of Pacinian corpuscles: a review". *Progress in neurobiology* 42(1):79–128 (1994)
- [26] Benjamin M: "The fascia of the limbs and back—a review". *Journal of anatomy* 214(1):1–18 (2009)
- [27] Benninghoff A: *Anatomie: Zellen-und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett-und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn-und Genitalsystem*. Elsevier, Urban&FischerVerlag (2008)
- [28] Bia A, Guerra-Pinto F, Pereira BS, Corte-Real N and Oliva XM: "Percutaneous osteotomies in hallux valgus: a systematic review". *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 57(1):123–130 (2018)
- [29] Blum JL: "The modified Mitchell osteotomy-bunionectomy: indications and technical considerations". *Foot & ankle international* 15(3):103–106 (1994)
- [30] Bolanowski Jr SJ, Gescheider GA, Verrillo RT and Checkosky CM: "Four channels mediate the mechanical aspects of touch". *The Journal of the Acoustical society of America* 84(5):1680–1694 (1988)
- [31] Bonivitch AR, Bonewald LF and Nicoletta DP: "Tissue strain amplification at the osteocyte lacuna: a microstructural finite element analysis". *Journal of biomechanics* 40(10):2199–2206 (2007)
- [32] Bonney G and Macnab I: "Hallux valgus and hallux rigidus: a critical survey of operative results". *The Journal of bone and joint surgery British volume* 34(3):366–385 (1952)
- [33] Bösch P, Markowski H and Rannicher V: "Technik und erste Ergebnisse der subkutanen distalen Metatarsale-I-Osteotomie". *Orthop Praxis* 26:51–56 (1990)

- 
- [34] Bösch P, Wanke S and Legenstein R: “Hallux valgus correction by the method of Bösch: a new technique with a seven-to-ten-year follow-up.” *Foot and ankle clinics* 5(3):485–98 (2000)
- [35] Bouley D, Alarcón C, Hildebrandt T and O’Connell-Rodwell CE: “The distribution, density and three-dimensional histomorphology of Pacinian corpuscles in the foot of the Asian elephant (*Elephas maximus*) and their potential role in seismic communication”. *Journal of Anatomy* 211(4):428–435 (2007)
- [36] Bovenzi M, Lindsell C and Griffin M: “Response of finger circulation to energy equivalent combinations of magnitude and duration of vibration”. *Occupational and environmental medicine* 58(3):185–193 (2001)
- [37] Bovenzi M, Welsh A, Della Vedova A and Griffin M: “Acute effects of force and vibration on finger blood flow”. *Occupational and Environmental Medicine* 63(2):84–91 (2006)
- [38] Britz HM, Jokihaara J, Leppänen OV, Järvinen TL and Cooper DM: “The effects of immobilization on vascular canal orientation in rat cortical bone”. *Journal of anatomy* 220(1):67–76 (2012)
- [39] Britz HM, Thomas CDL, Clement JG and Cooper DM: “The relation of femoral osteon geometry to age, sex, height and weight”. *Bone* 45(1):77–83 (2009)
- [40] Brogan K, Voller T, Gee C, Borbely T and Palmer S: “Third-generation minimally invasive correction of hallux valgus: technique and early outcomes”. *International orthopaedics* 38(10):2115–2121 (2014)
- [41] Brookes M: “The vascularization of long bones in the human foetus”. *Journal of Anatomy* 92(Pt 2):261 (1958)
- [42] Brookes M and Harrison R: “The vascularization of the rabbit femur and tibiofibula”. *Journal of Anatomy* 91(Pt 1):61 (1957)
- [43] Brookes M and Revell WJ: “Bone blood flow measurement—1: Indicator dilution”. In *Blood Supply of Bone*, pages 217–236. Springer (1998)
- [44] Buckwalter J and Cooper R: “Bone structure and function.” *Instructional course lectures* 36:27–48 (1987)
- [45] Buckwalter J, Glimcher M, Cooper R and Recker R: “Bone biology. I: Structure, blood supply, cells, matrix, and mineralization.” *Instructional course lectures* 45:371–386 (1996)

- 
- [46] Buenzli PR and Sims NA: “Quantifying the osteocyte network in the human skeleton”. *Bone* 75:144–150 (2015)
- [47] Burger E: “Mechanotransduction in bone-role of the lacuno-canalicular network”. *FASEB J* 13:1243–1250 (1998)
- [48] Çabuk H, Kuşku Çabuk F, Tekin AÇ, Dedeoğlu SS, Çakar M and Büyükkurt CD: “Lower numbers of mechanoreceptors in the posterior cruciate ligament and anterior capsule of the osteoarthritic knees”. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 25:3146–3154 (2017)
- [49] Campos FF, Pellico LG, Alias MG and Fernandez-Valencia R: “A study of the nutrient foramina in human long bones”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 9(3):251–255 (1987)
- [50] Chen YJ, Hsu R, Shih HN, Huang TJ and Hsu KY: “Distal chevron osteotomy with intra-articular lateral soft-tissue release for treatment of moderate to severe hallux valgus deformity.” *Journal of the Formosan Medical Association* 95(10):776–781 (1996)
- [51] Cho N, Kim S, Kwon DJ and Kim H: “The prevalence of hallux valgus and its association with foot pain and function in a rural Korean community”. *The Journal of bone and joint surgery British volume* 91(4):494–498 (2009)
- [52] Choi YR, Lee HS, Jeong JJ, Kim SW, Jeon IH, Lee DH and Lee WC: “Hallux valgus correction using transarticular lateral release with distal chevron osteotomy”. *Foot & ankle international* 33(10):838–843 (2012)
- [53] Cohen J: *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press (2013)
- [54] Cohen J and Harris WH: “The three-dimensional anatomy of Haversian systems”. *JBJS* 40(2):419–434 (1958)
- [55] Cong Y, Cheung JTM, Leung AK and Zhang M: “Effect of heel height on in-shoe localized triaxial stresses”. *Journal of biomechanics* 44(12):2267–2272 (2011)
- [56] Cooper DM, Erickson B, Peele AG, Hannah K, Thomas C and Clement JG: “Visualization of 3D osteon morphology by synchrotron radiation micro-CT”. *Journal of anatomy* 219(4):481–489 (2011)
- [57] Cooper DM, Thomas CDL, Clement JG and Hallgrímsson B: “Three-dimensional microcomputed tomography imaging of basic multicellular unit-related resorption spaces in

- human cortical bone". *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists* 288(7):806–816 (2006)
- [58] Cooper DM, Thomas CDL, Clement JG, Turinsky AL, Sensen CW and Hallgrímsson B: "Age-dependent change in the 3D structure of cortical porosity at the human femoral midshaft". *Bone* 40(4):957–965 (2007)
- [59] Cooper DM, Turinsky AL, Sensen CW and Hallgrímsson B: "Quantitative 3D analysis of the canal network in cortical bone by micro-computed tomography". *The Anatomical Record Part B: The New Anatomist: An Official Publication of the American Association of Anatomists* 274(1):169–179 (2003)
- [60] Corless JR: "A modification of the Mitchell procedure". *J Bone Joint Surg, B* 58:138 (1976)
- [61] Corte-Real NM and Moreira RM: "Modified biplanar chevron osteotomy". *Foot & ankle international* 30(12):1149–1153 (2009)
- [62] Coughlin MJ: "Hallux valgus: causes, evaluation, and treatment". *Postgraduate medicine* 75(5):174–187 (1984)
- [63] Coughlin MJ: "Juvenile hallux valgus: etiology and treatment". *Foot & ankle international* 16(11):682–697 (1995)
- [64] Coughlin MJ: "Hallux valgus in men: effect of the distal metatarsal articular angle on hallux valgus correction". *Foot & ankle international* 18(8):463–470 (1997)
- [65] Coughlin MJ and Jones CP: "Hallux valgus: demographics, etiology, and radiographic assessment". *Foot & ankle international* 28(7):759–777 (2007)
- [66] Coughlin MJ, Mann RA, Saltzman CL *et al.*: *Surgery of the foot and ankle*, volume 1. Mosby St. Louis (1999)
- [67] Coughlin MJ and Thompson FM: "The high price of high-fashion footwear". *Instructional course lectures* 44:371–377 (1995)
- [68] Coull R and Stephens M: "(ii) Operative decision making in hallux valgus". *Current Orthopaedics* 16(3):180–186 (2002)
- [69] Crane MA, Kato KM, Patel BA and Huttenlocker AK: "Histovariability in human clavicular cortical bone microstructure and its mechanical implications". *Journal of Anatomy* 235(5):873–882 (2019)

- 
- [70] Crosby LA and Bozarth GR: "Fixation comparison for chevron osteotomies". *Foot & ankle international* 19(1):41–43 (1998)
- [71] Currey JD: "Some effects of ageing in human Haversian systems". *Journal of anatomy* 98(Pt 1):69 (1964)
- [72] Currey JD: *Bones: Structure and Mechanics*. Princeton University Press (2002)
- [73] Currey JD: "The many adaptations of bone". *Journal of biomechanics* 36(10):1487–1495 (2003)
- [74] Cvetkovic VJ, Najman S, Rajkovic J, Zabar A, Vasiljevic P, Djordjevic LB and Trajanovic M: "A comparison of the microarchitecture of lower limb long bones between some animal models and humans: a review." *Veterinarni Medicina* 58(7) (2013)
- [75] Dawson J, Thorogood M, Marks SA, Juszczak E, Dodd C, Lavis G and Fitzpatrick R: "The prevalence of foot problems in older women: a cause for concern". *Journal of Public Health* 24(2):77–84 (2002)
- [76] Dayton P, Glynn A and LoPiccolo J: "Medial incision approach to the first metatarsophalangeal joint". *The Journal of foot and ankle surgery* 40(6):414–417 (2001)
- [77] De Margerie E: "Laminar bone as an adaptation to torsional loads in flapping flight". *Journal of Anatomy* 201(6):521–526 (2002)
- [78] De Saint-Georges L and Miller S: "The micocirculation of bone and marrow in the diaphysis of the rat hemopoietic long bones". *The Anatomical Record* 233(2):169–177 (1992)
- [79] de Souza MF and Athanazio DA: "Intraprostatic Pacinian corpuscle does exist!" *Pathology* 54(4):479–480 (2022)
- [80] Debrunner A: "Knochennekrosen". *Debrunner AM (Hrg) Orthopädie, orthopädische Chirurgie Verlag Hans Huber, Bern, Göttingen, Toronto, Seattle* pages 341–8 (1994)
- [81] Del Vecchio JJ, Ghioldi ME, Uzair AE, Chemes LN, Manzanares-Céspedes MC, Dealbera ED and Dalmau-Pastor M: "Percutaneous, intra-articular, chevron osteotomy (PeICO) for the treatment of hallux valgus: a cadaveric study". *Foot & ankle international* 40(5):586–595 (2019)
- [82] Dhukaram V, Chapman AP and Upadhyay PK: "Minimally invasive forefoot surgery: a cadaveric study". *Foot & ankle international* 33(12):1139–1144 (2012)

- [83] Donders J, Prins J, Kloen P, Streekstra G, Cole P, Kleipool R and Dobbe J: “Three-dimensional topography of scapular nutrient foramina”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 42(8):887–892 (2020)
- [84] Doube M, Kłosowski MM, Arganda-Carreras I, Cordelières FP, Dougherty RP, Jackson JS, Schmid B, Hutchinson JR and Shefelbine SJ: “BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ”. *Bone* 47(6):1076–1079 (2010)
- [85] Dufour AB, Casey VA, Golightly YM and Hannan MT: “Characteristics associated with hallux valgus in a population-based foot study of older adults”. *Arthritis care & research* 66(12):1880–1886 (2014)
- [86] Dunn J, Link C, Felson D, Crincoli M, Keysor J and McKinlay J: “Prevalence of foot and ankle conditions in a multiethnic community sample of older adults”. *American journal of epidemiology* 159(5):491–498 (2004)
- [87] Easley ME and Trnka HJ: “Current concepts review: hallux valgus part 1: pathomechanics, clinical assessment, and nonoperative management”. *Foot & ankle international* 28(5):654–659 (2007)
- [88] Easley ME and Trnka HJ: “Current concepts review: hallux valgus part II: operative treatment”. *Foot & ankle international* 28(6):748–758 (2007)
- [89] Ehrmantant WR, Graham III WP, Towfighi J, Mackay DR and Ehrlich HP: “A histological and anatomical profile of pacinian corpuscles from Dupuytren’s contracture and the expression of nerve growth factor receptor”. *Plastic and reconstructive surgery* 114(3):721–727 (2004)
- [90] ElSaid AG, Tisdell C, Donley B, Sferra J, Neth D and Davis B: “First metatarsal bone: an anatomic study”. *Foot & ankle international* 27(12):1041–1048 (2006)
- [91] Enge DJ, Fonseca EKUN, Baptista E, Santos DdCB, Rosemberg LA *et al.*: “Avascular necrosis: radiological findings and main sites of involvement-pictorial essay”. *Radiologia Brasileira* 52:187–192 (2019)
- [92] Engelhardt P, Schuh R and Wanivenhaus A: “Operationen am Hallux und Metatarsale I”. In *Orthopädische Fußchirurgie*, pages 109–135. Springer (2018)
- [93] Eustace S, Byrne J, Beausang O, Codd M, Stack J and Stephens M: “Hallux valgus, first metatarsal pronation and collapse of the medial longitudinal arch—a radiological correlation”. *Skeletal radiology* 23(3):191–194 (1994)

- [94] Eustace S, Williamson D, Wilson M, O’Byrne J, Bussolari L, Thomas M, Stephens M, Stack J and Weissman B: “Tendon shift in hallux valgus: observations at MR imaging”. *Skeletal radiology* 25(6):519–524 (1996)
- [95] Faber FW, Kleinrensink GJ, Verhoog MW, Vijn AH, Snijders CJ, Mulder PG and Verhaar JA: “Mobility of the first tarsometatarsal joint in relation to hallux valgus deformity: anatomical and biomechanical aspects”. *Foot & ankle international* 20(10):651–656 (1999)
- [96] Faour-Martín O, Martín-Ferrero MÁ, García JAV, Vega-Castrillo A and de la Red-Gallego MÁ: “Long-term results of the retrocapital metatarsal percutaneous osteotomy for hallux valgus”. *International orthopaedics* 37(9):1799–1803 (2013)
- [97] Feito J, Cobo J, Santos-Briz A and Vega J: “Pacinian corpuscles in human lymph nodes”. *The Anatomical Record* 300(12):2233–2238 (2017)
- [98] Feito J, Ramos-García JL, Gago Á, Cobo JL, García-Suárez O, Junquera LM and Vega JA: “Pacinian corpuscles in a cervical chondrocutaneous remnant: a case report and update of pacinian corpuscles”. *The American Journal of Dermatopathology* 38(3):231–235 (2016)
- [99] Ferrari J, Higgins JP and Prior TD: “Interventions for treating hallux valgus (abductovalgus) and bunions”. *Cochrane Database of Systematic Reviews* (1) (2004)
- [100] Ford LA: “The first ray is the major component of the medial column of the foot. Preface”. *Clinics in podiatric medicine and surgery* 26(3):xvii (2009)
- [101] Fraissler L, Konrads C, Hoberg M, Rudert M and Walcher M: “Treatment of hallux valgus deformity”. *EFORT open reviews* 1(8):295–302 (2016)
- [102] Freitag S, Gherardi R and Wechsler J: “Hyperplastic pacinian corpuscles: an uncommonly encountered lesion of the hand”. *Journal of cutaneous pathology* 21(5):457–460 (1994)
- [103] Frey C and Zamora J: “The effects of obesity on orthopaedic foot and ankle pathology”. *Foot & ankle international* 28(9):996–999 (2007)
- [104] Gammon G and Bronk D: “The discharge of impulses from Pacinian corpuscles in the mesentery and its relation to vascular changes”. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 114(1):77–84 (1935)
- [105] García-Martínez I, García-Mesa Y, García-Piqueras J, Martínez-Pubil A, Cobo JL, Feito J, García-Suárez O and Vega JA: “Sensory innervation of the human palmar aponeurosis in healthy individuals and patients with palmar fibromatosis”. *Journal of anatomy* 240(5):972–984 (2022)

- 
- [106] García-Suárez O, Calavia MG, Pérez-Moltó FJ, Alvarez-Abad C, Pérez-Piñera P, Cobo JM and Vega JA: “Immunohistochemical profile of human pancreatic pacinian corpuscles”. *Pancreas* 39(3):403–410 (2010)
- [107] Garrow AP, Papageorgiou A, Silman AJ, Thomas E, Jayson MI and Macfarlane GJ: “The Grading of Hallux ValgusThe Manchester Scale”. *Journal of the American Podiatric Medical Association* 91(2):74–78 (2001)
- [108] Gerabek WE, Haage BD, Keil G and Wegner W: *Enzyklopädie Medizingeschichte*. ISBN 3-11-015714-4. Walter de Gruyter, Berlin, S. 857 (2011)
- [109] Germann C, Sutter R and Nanz D: “Novel observations of Pacinian corpuscle distribution in the hands and feet based on high-resolution 7-T MRI in healthy volunteers”. *Skeletal Radiology* 50(6):1249–1255 (2021)
- [110] Gessi M, Messing-Jünger M, Röhrig A, Gielen GH, Pietsch T and van Landeghem FK: “Incidental neuropathological findings in a child with cervical meningoencephalocele”. *Brain Pathology* 22(5):737 (2012)
- [111] Giannini S, Cavallo M, Faldini C, Luciani D and Vannini F: “The SERI distal metatarsal osteotomy and Scarf osteotomy provide similar correction of hallux valgus”. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 471(7):2305–2311 (2013)
- [112] Giannini S, Ceccarelli F, Bevoni R and Vannini F: “Hallux valgus surgery: the minimally invasive bunion correction (SERI)”. *Techniques in Foot & Ankle Surgery* 2(1):11–20 (2003)
- [113] Giannini S, Faldini C, Nanni M, Di Martino A, Luciani D and Vannini F: “A minimally invasive technique for surgical treatment of hallux valgus: simple, effective, rapid, inexpensive (SERI)”. *International orthopaedics* 37(9):1805–1813 (2013)
- [114] Gill LH, Martin DF, Coumas JM and Kiebzak GM: “Fixation with bioabsorbable pins in chevron bunionectomy”. *JBJS* 79(10):1510–8 (1997)
- [115] Glasoe WM, Allen MK and Saltzman CL: “First Ray Dorsal Monility in Relation to Hallux Vlagus Deformity and First Intermetatarsal Angle”. *Foot & ankle international* 22(2):98–101 (2001)
- [116] Glasoe WM, Nuckley DJ and Ludewig PM: “Hallux valgus and the first metatarsal arch segment: a theoretical biomechanical perspective”. *Physical therapy* 90(1):110–120 (2010)
- [117] Glasoe WM, Yack HJ and Saltzman CL: “Anatomy and biomechanics of the first ray”. *Physical therapy* 79(9):854–859 (1999)

- 
- [118] Gray H, Standring S, Ellis H and Berkovitz B: *The anatomical basis of clinical practice*. Elsevier Churchill Livingstone (2005)
- [119] Grebing BR and Coughlin MJ: “The effect of ankle position on the exam for first ray mobility”. *Foot & ankle international* 25(7):467–475 (2004)
- [120] Greider Jr JL and Flatt AE: “Glomus tumor associated with Pacinian hyperplasia—case report”. *The Journal of Hand Surgery* 7(2):113–117 (1982)
- [121] Grle M, Vrgoc G, Bohacek I, Hohnjec V, Martinac M, Brkic I, Stefan L and Jotanovic Z: “Surgical treatment of moderate hallux valgus: a comparison of distal chevron metatarsal osteotomy with and without lateral soft-tissue release”. *Foot & ankle specialist* 10(6):524–530 (2017)
- [122] Grüneboom A, Hawwari I, Weidner D, Culemann S, Müller S, Henneberg S, Brenzel A, Merz S, Bornemann L, Zec K *et al.*: “A network of trans-cortical capillaries as mainstay for blood circulation in long bones”. *Nature Metabolism* 1(2):236–250 (2019)
- [123] Hannan MT, Menz HB, Jordan JM, Cupples LA, Cheng CH and Hsu YH: “Hallux valgus and lesser toe deformities are highly heritable in adult men and women: the Framingham foot study”. *Arthritis care & research* 65(9):1515 (2013)
- [124] Hansen ST: “Introduction: the first metatarsal: it’s importance in the human foot”. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery* 26(3):351–354 (2009)
- [125] Hardy R and Clapham J: “Observations on hallux valgus”. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume* 33(3):376–391 (1951)
- [126] Harris RI and Beath T: “The short first metatarsal: its incidence and clinical significance”. *JBJS* 31(3):553–565 (1949)
- [127] Harris WH, Haywood EA, Lavorgna J and Hamblen DL: “Spatial and temporal variations in cortical bone formation in dogs: a long-term study”. *JBJS* 50(6):1118–1128 (1968)
- [128] Hashimoto T, Hamada T, Sasaguri Y and Suzuki K: “Immunohistochemical approach for the investigation of nerve distribution in the shoulder joint capsule.” *Clinical orthopaedics and related research* (305):273–282 (1994)
- [129] Hatstrup SJ and Johnson KA: “Chevron osteotomy: analysis of factors in patients’ dissatisfaction”. *Foot & ankle* 5(6):327–332 (1985)

- [130] Havers C: “1691. Osteologia nova, or some new observations of the bones, and the parts belonging to them, with the manner of their accretion and nutrition”
- [131] Havill LM: “Osteon remodeling dynamics in *Macaca mulatta*: normal variation with regard to age, sex, and skeletal maturity”. *Calcified tissue international* 74(1):95–102 (2004)
- [132] Hecht PJ and Lin TJ: “Hallux valgus”. *Medical Clinics* 98(2):227–232 (2014)
- [133] Henderson R: “The position of the nutrient foramen in the growing tibia and femur of the rat.” *Journal of anatomy* 125(Pt 3):593 (1978)
- [134] Hennig C, Thomas CDL, Clement JG and Cooper DM: “Does 3D orientation account for variation in osteon morphology assessed by 2D histology?” *Journal of anatomy* 227(4):497–505 (2015)
- [135] Heřt J, Fiala P and Petrtyl M: “Osteon orientation of the diaphysis of the long bones in man”. *Bone* 15(3):269–277 (1994)
- [136] Hohmann G: “Der Hallux valgus und die übrigen Zehenverkrümmungen”. In *Ergebnisse der Chirurgie und Orthopädie*, pages 308–376. Springer (1925)
- [137] Horne G, Tanzer T and Ford M: “Chevron osteotomy for the treatment of hallux valgus.” *Clinical orthopaedics and related research* (183):32–36 (1984)
- [138] Hromádka R, Barták V, Bek J, Popelka Jr S, Bednářová J and Popelka S: “Lateral release in hallux valgus deformity: from anatomic study to surgical tip”. *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 52(3):298–302 (2013)
- [139] Huang PJ, Lin YC, Fu YC, Yang YH, Cheng YM and Cheng YM: “Radiographic evaluation of minimally invasive distal metatarsal osteotomy for hallux valgus”. *Foot & ankle international* 32(5):503–507 (2011)
- [140] Hueter C and Hueter KH: *Klinik der Gelenkkrankheiten mit Einschluss der Orthopaedie: auf anatomisch-physiologischen Grundlagen nach klinischen Beobachtungen für Ärzte und Studirende bearbeitete*, volume 1. Vogel (1870)
- [141] Hughes J, Clark P, Jagoe RR, Gerber C and Klenerman L: “The pattern of pressure distribution under the weightbearing forefoot”. *The Foot* 1(3):117–124 (1991)
- [142] Iannò B, Familiari F, De Gori M, Galasso O, Ranuccio F and Gasparini G: “Midterm results and complications after minimally invasive distal metatarsal osteotomy for treatment of hallux valgus”. *Foot & ankle international* 34(7):969–977 (2013)

- [143] Iggo A and Andres K: "Morphology of cutaneous receptors". *Annual review of neuroscience* 5(1):1–31 (1982)
- [144] Il'inskii O, Volkova N and Cherepnov V: "Structure and function of Pacinian corpuscles". *Neuroscience Translations* 2:637–643 (1968)
- [145] Imai S, Kikuchi K and Matsusue Y: "Digital pacinian corpuscle hyperplasia". *Journal of the American Society for Surgery of the Hand* 3(3):175–180 (2003)
- [146] Jaffe HL: "The vessel canals in normal and pathological bone". *The American Journal of Pathology* 5(3):323 (1929)
- [147] Jahss M: "Hallux valgus: further considerations—the first metatarsal head." *Foot & ankle* 2(1):1–4 (1981)
- [148] Jahss MH, Troy AI and Kummer F: "Roentgenographic and mathematical analysis of first metatarsal osteotomies for metatarsus primus varus: a comparative study". *Foot & ankle* 5(6):280–321 (1985)
- [149] Jauch K, Mutschler W, Hoffmann J and Kanz K: *Chirurgie Basisweiterbildung: In 100 Schritten durch den Common Trunk*, volume 2. Auflage, of *SpringerLink : Bücher*. Springer Berlin Heidelberg, S.224-225 (2012)
- [150] Jaworek T: "The intrinsic vascular supply to the first metatarsal. Surgical considerations." *Journal of the American Podiatry Association* 63(11):394–395 (1973)
- [151] Jiménez I, Marcos-García A, Muratore G and Medina J: "Pacinian corpuscles neuroma. An exceptional cause of pain in the hand". *The Journal of Hand Surgery (Asian-Pacific Volume)* 22(02):229–231 (2017)
- [152] Jin ZW, Cho KH, Xu DY, You YQ, Kim JH, Murakami G and Abe H: "Pacinian corpuscles in the human fetal foot: A study using 3D reconstruction and immunohistochemistry". *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger* 227:151421 (2020)
- [153] Johnson JE, Clanton TO, Baxter DE and Gottlieb MS: "Comparison of Chevron osteotomy and modified McBride bunionectomy for correction of mild to moderate hallux valgus deformity". *Foot & ankle* 12(2):61–68 (1991)
- [154] Johnson K and Kile T: "Hallux valgus due to cuneiform-metatarsal instability." *Journal of the Southern Orthopaedic Association* 3(4):273–282 (1994)

- 
- [155] Johnson KA, Cofield RH and Morrey BF: “Chevron osteotomy for hallux valgus.” *Clinical orthopaedics and related research* (142):44–47 (1979)
- [156] Johnson KO: “The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors”. *Current opinion in neurobiology* 11(4):455–461 (2001)
- [157] Jones FW: *Buchanan’s manual of anatomy*. Williams and Wilkins (1949)
- [158] Jones KJ, Feiwell LA, Freedman EL and Cracchiolo 3rd A: “The effect of chevron osteotomy with lateral capsular release on the blood supply to the first metatarsal head.” *The Journal of bone and joint surgery American volume* 77(2):197–204 (1995)
- [159] Jowsey J: “Studies of Haversian systems in man and some animals.” *Journal of anatomy* 100(Pt 4):857 (1966)
- [160] Kadakia AR, Smerek JP and Myerson MS: “Radiographic results after percutaneous distal metatarsal osteotomy for correction of hallux valgus deformity”. *Foot & ankle international* 28(3):355–360 (2007)
- [161] Kalen V and Brecher A: “Relationship between adolescent bunions and flatfeet”. *Foot & ankle* 8(6):331–336 (1988)
- [162] Kapandji AI: *Funktionelle Anatomie der Gelenke: schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik; einbändige Ausgabe-obere Extremität, untere Extremität, Rumpf und Wirbelsäule*. Georg Thieme Verlag (2009)
- [163] Karry LKL, Siu-Wah K and Yuen-Hon C: “Percutaneous chevron osteotomy in treating hallux valgus: Hong Kong experience and mid-term results”. *Journal of orthopaedics, Trauma and Rehabilitation* 19(1):25–30 (2015)
- [164] Kato T and Watanabe S: “The etiology of hallux valgus in Japan.” *Clinical orthopaedics and related research* (157):78–81 (1981)
- [165] Kholinne E, Lee HJ, Lee YM, Lee SJ, Deslivia MF, Kim GY, Lim S and Jeon IH: “Mechanoreceptor profile of the lateral collateral ligament complex in the human elbow”. *Asia-Pacific journal of sports medicine, arthroscopy, rehabilitation and technology* 14:17–21 (2018)
- [166] Kilicarslan K, Kilicarslan A, Demirkale I, Aytekin MN, Aksekili MA and Uğurlu M: “Immunohistochemical analysis of mechanoreceptors in transverse acetabular ligament and labrum: a prospective analysis of 35 cases”. *Acta Orthop Traumatol Turc* 49(4):394–8 (2015)

- 
- [167] Kim AW, Rosen AM, Brander VA and Buchanan TS: “Selective muscle activation following electrical stimulation of the collateral ligaments of the human knee joint”. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 76(8):750–757 (1995)
- [168] Kim JH, Park C, Yang X, Murakami G, Abe H and Shibata S: “Pacinian corpuscles in the human fetal finger and thumb: a study using 3D reconstruction and immunohistochemistry”. *The Anatomical Record* 301(1):154–165 (2018)
- [169] Kim JN, Lee JY, Shin KJ, Gil YC, Koh KS and Song WC: “Haversian system of compact bone and comparison between endosteal and periosteal sides using three-dimensional reconstruction in rat”. *Anatomy & cell biology* 48(4):258–261 (2015)
- [170] Kim YT and Azuma H: “The nerve endings of the acetabular labrum”. *Clinical Orthopaedics and Related Research*® 320:176–181 (1995)
- [171] Kizilkanat E, Boyan N, Ozsahin ET, Soames R and Oguz O: “Location, number and clinical significance of nutrient foramina in human long bones”. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger* 189(1):87–95 (2007)
- [172] Klaue K, Hansen ST and Masquelet AC: “Clinical, quantitative assessment of first tarso-metatarsal mobility in the sagittal plane and its relation to hallux valgus deformity”. *Foot & ankle international* 15(1):9–13 (1994)
- [173] Klein C, Groll-Knapp E, Kundi M and Kinz W: “Increased hallux angle in children and its association with insufficient length of footwear: a community based cross-sectional study”. *BMC musculoskeletal disorders* 10(1):1–7 (2009)
- [174] Klein-Nulend J, Bakker AD, Bacabac RG, Vatsa A and Weinbaum S: “Mechanosensation and transduction in osteocytes”. *Bone* 54(2):182–190 (2013)
- [175] Klosok J, Pring D, Jessop J and Maffulli N: “Chevron or Wilson metatarsal osteotomy for hallux valgus. A prospective randomised trial”. *The Journal of bone and joint surgery British volume* 75(5):825–829 (1993)
- [176] Knudsen F, Andersen M and Krag C: “The arterial supply of the clavicle”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 11(3):211–214 (1989)
- [177] Koshima I, Moriguchi T and Soeda S: “Electron microscopic observations of degeneration of human Pacinian corpuscles in amputated fingers.” *Plastic and reconstructive surgery* 89(2):243–8 (1992)

- 
- [178] Kothapalli J: “Nutrient Foramina Architecture In Metacarpal And Metatarsal Bones”. *Int J Anat Res* 6(4.2):5848–52 (2018)
- [179] Kramer J: “Die Kramer-Osteotomie zur Behandlung des Hallux valgus und des Digitus quintus varus”. *Operative Orthopädie und Traumatologie* 2(1):29–38 (1990)
- [180] Kuhn MA, Lippert III FG, Phipps MJ and Williams C: “Blood flow to the metatarsal head after chevron bunionectomy”. *Foot & ankle international* 26(7):526–529 (2005)
- [181] Kusumbe AP, Ramasamy SK and Adams RH: “Coupling of angiogenesis and osteogenesis by a specific vessel subtype in bone”. *Nature* 507(7492):323–328 (2014)
- [182] Lacroix P: “The organization of bones”. *Academic Medicine* 26(6):493 (1951)
- [183] Laing P: “The arterial supply of the adult humerus”. *JBJS* 38(5):1105–1116 (1956)
- [184] Lang-Stevenson AI: “Induction of hyperplasia and hypertrophy of pacinian corpuscles.” *British medical journal (Clinical research ed)* 288(6422):972 (1984)
- [185] Lanyon L and Baggott D: “Mechanical function as an influence on the structure and form of bone”. *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume* 58(4):436–443 (1976)
- [186] Lee HJ, Chung JW, Chu IT and Kim YC: “Comparison of distal chevron osteotomy with and without lateral soft tissue release for the treatment of hallux valgus”. *Foot & ankle international* 31(4):291–295 (2010)
- [187] Lee KT and Young K: “Measurement of first-ray mobility in normal vs. hallux valgus patients”. *Foot & ankle international* 22(12):960–964 (2001)
- [188] Lee M, Walsh J, Smith MM, Ling J, Wines A and Lam P: “Hallux valgus correction comparing percutaneous chevron/akin (PECA) and open scarf/akin osteotomies”. *Foot & ankle international* 38(8):838–846 (2017)
- [189] Lee MS and Grossman JP: *Complications in Foot and Ankle Surgery: Management Strategies*. Springer (2017)
- [190] Lee W, Marshall J and Sissons H: “Calcium accretion and bone formation in dogs: An experimental comparison between the results of Ca45 kinetic analysis and tetracycline labelling”. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume* 47(1):157–180 (1965)
- [191] Levi L and Curri S: “Multiple Pacinian neurofibroma and relationship with the finger-tip arterio-venous anastomoses”. *British Journal of Dermatology* 102(3):345–349 (1980)

- [192] Levick A: “Netter’s concise atlas of orthopaedic anatomy”. *Australasian Chiropractic & Osteopathy* 12(2):86 (2004)
- [193] Lin I, Bonar SK, Anderson RB and Davis WH: “Distal soft tissue release using direct and indirect approaches: an anatomic study”. *Foot & ankle international* 17(8):458–463 (1996)
- [194] Lin YC, Cheng YM, Chang JK, Chen CH and Huang PJ: “Minimally invasive distal metatarsal osteotomy for mild-to-moderate hallux valgus deformity”. *The Kaohsiung journal of medical sciences* 25(8):431–437 (2009)
- [195] Lisfranc MJ: *Nouvelle méthode opératoire pour l’amputation partielle du pied dans son articulation tarso-métatarsienne: méthode précédée des nombreuses modifications qu’a subies celle de Chopart*. Gabon, Paris (1815)
- [196] Longia G, Ajmani M, Saxena S and Thomas R: “Study of diaphyseal nutrient foramina in human long bones”. *Cells Tissues Organs* 107(4):399–406 (1980)
- [197] Lopez-Curto JA, Basingthwaighte JB and Kelly PJ: “Anatomy of the microvasculature of the tibial diaphysis of the adult dog”. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 62(8):1362 (1980)
- [198] Lucas y Hernandez J, Golanó P, Roshan-Zamir S, Darcel V, Chauveaux D and Laffenêtre O: “Treatment of moderate hallux valgus by percutaneous, extra-articular reverse-L Chevron (PERC) osteotomy”. *The bone & joint journal* 98(3):365–373 (2016)
- [199] Ludwig O: *Ganganalyse in der Praxis: Anwendung in Prävention, Therapie und Versorgung*. Maurer (2012)
- [200] Lui TH, Ng S and Chan Kb: “Endoscopic distal soft tissue procedure in hallux valgus surgery”. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery* 21(11):1403–e1 (2005)
- [201] Luria T, Dudkiewicz I, Burg A, Heller S, Salai M and Tytiun Y: “The early results of minimally invasive technique for hallux valgus repair”. *Foot (Edinburgh, Scotland)* 20(4):118–120 (2010)
- [202] Lütken P: “Investigation into the position of the nutrient foramina and the direction of the vessel canals in the shafts of the humerus and femur in man”. *Cells Tissues Organs* 9(1-2):57–68 (1950)

- [203] Madjarevic M, Kolundzic R, Trkulja V, Mirkovic M and Pecina M: “Biomechanical analysis of functional adaptation of metatarsal bones in statically deformed feet”. *International orthopaedics* 33(1):157–163 (2009)
- [204] Maffulli N, Longo UG, Marinozzi A and Denaro V: “Hallux valgus: effectiveness and safety of minimally invasive surgery. A systematic review”. *British medical bulletin* 97(1):149–167 (2011)
- [205] Magerl F: “Stable osteotomies for treatment of hallux valgus and metatarsus primus varus”. *Der Orthopade* 11(4):170–180 (1982)
- [206] Maggiano IS, Maggiano CM, Clement JG, Thomas CDL, Carter Y and Cooper DM: “Three-dimensional reconstruction of Haversian systems in human cortical bone using synchrotron radiation-based micro-CT: morphology and quantification of branching and transverse connections across age”. *Journal of anatomy* 228(5):719–732 (2016)
- [207] Maggiano IS, Maggiano CM and Cooper DM: “Osteon circularity and longitudinal morphology: Quantitative and qualitative three-dimensional perspectives on human Haversian systems”. *Micron* 140:102955 (2021)
- [208] Maggio A and Franklin D: “An examination of histomorphometric relationships in the anterior and posterior human femoral cortex”. *Journal of Bone and Mineral Metabolism* 39(4):649–660 (2021)
- [209] Magnan B, Pezzè L, Rossi N and Bartolozzi P: “Percutaneous distal metatarsal osteotomy for correction of hallux valgus”. *JBJS* 87(6):1191–1199 (2005)
- [210] Malal JG, Shaw-Dunn J and Kumar CS: “Blood supply to the first metatarsal head and vessels at risk with a chevron osteotomy”. *JBJS* 89(9):2018–2022 (2007)
- [211] Mancuso JE, Abramow SP, Landsman MJ, Waldman M and Carioscia M: “The zero-plus first metatarsal and its relationship to bunion deformity”. *The Journal of foot and ankle surgery* 42(6):319–326 (2003)
- [212] Mann R, Coughlin M and Saltzman C: “Surgery of the foot and ankle, Vol. 1”. *St Louis, MO, Mosby* pages 195–202 (1993)
- [213] Mann RA and Coughlin MJ: “Hallux valgus—etiology, anatomy, treatment and surgical considerations.” *Clinical orthopaedics and related research* (157):31–41 (1981)
- [214] Mann RA and Donatto KC: “The chevron osteotomy: a clinical and radiographic analysis”. *Foot & ankle international* 18(5):255–261 (1997)

- [215] Martínez-Reina J, García-Rodríguez J, Mora-Macías J, Domínguez J and Reina-Romo E: “Comparison of the volumetric composition of lamellar bone and the woven bone of calluses”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 232(7):682–689 (2018)
- [216] Mavropoulos A, Rizzoli R and Ammann P: “Different responsiveness of alveolar and tibial bone to bone loss stimuli”. *Journal of Bone and Mineral Research* 22(3):403–410 (2007)
- [217] Mayya A, Banerjee A and Rajesh R: “Mammalian cortical bone in tension is non-Haversian”. *Scientific reports* 3(1):1–6 (2013)
- [218] McGann M, Langan TM, Brandão RA, Berlet G and Prissel M: “Structures at risk during percutaneous extra-articular chevron osteotomy of the distal first metatarsal”. *Foot & ankle specialist* (2019)
- [219] McGregor A and DuPlessis D: “A Synopsis of Surgical Anatomy. London Wright” (1969)
- [220] McKenzie JA and Silva MJ: “Comparing histological, vascular and molecular responses associated with woven and lamellar bone formation induced by mechanical loading in the rat ulna”. *Bone* 48(2):250–258 (2011)
- [221] Meier PJ and Kenzora JE: “The risks and benefits of distal first metatarsal osteotomies”. *Foot & ankle* 6(1):7–17 (1985)
- [222] Menz HB and Munteanu SE: “Radiographic validation of the Manchester scale for the classification of hallux valgus deformity”. *Rheumatology* 44(8):1061–1066 (2005)
- [223] Menz HB, Roddy E, Marshall M, Thomas MJ, Rathod T, Peat GM and Croft PR: “Epidemiology of shoe wearing patterns over time in older women: associations with foot pain and hallux valgus”. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences* 71(12):1682–1687 (2016)
- [224] Mescher AL: *Junqueira’s basic histology: text and atlas*. New York: McGraw Hill (2018)
- [225] Meyer C, Alt V, Hassanin H, Heiss C, Stahl JP, Giebel G, Koebke J and Schnettler R: “The arteries of the humeral head and their relevance in fracture treatment”. *Surgical and radiologic anatomy* 27(3):232–237 (2005)
- [226] Milovanovic P, Zimmermann EA, Hahn M, Djonic D, Püschel K, Djuric M, Amling M and Busse B: “Osteocytic canalicular networks: morphological implications for altered mechanosensitivity”. *ACS nano* 7(9):7542–7551 (2013)

- [227] Minokawa S, Yoshimura I, Kanazawa K, Hagio T and Yamamoto T: “Effect of minimally invasive distal first metatarsal osteotomy on blood flow of the metatarsal head”. *Journal of Orthopaedic Science* 24(4):693–696 (2019)
- [228] Miszkiewicz JJ: “Investigating histomorphometric relationships at the human femoral midshaft in a biomechanical context”. *Journal of bone and mineral metabolism* 34(2):179–192 (2016)
- [229] Miszkiewicz JJ, Valentin F, Vrahnas C, Sims NA, Vongsvivut J, Tobin MJ and Clark G: “Bone loss markers in the earliest Pacific Islanders”. *Scientific Reports* 11(1):1–16 (2021)
- [230] Mitchell LA and Baxter DE: “A Chevron-Akin double osteotomy for correction of hallux valgus”. *Foot & ankle* 12(1):7–14 (1991)
- [231] Mohsin S, Taylor D and Lee T: “Three-dimensional reconstruction of Haversian systems in ovine compact bone”. *European journal of morphology* 40(5):309–315 (2002)
- [232] Monreal-Redondo D and Fernández-Camacho F: “Diaphyseal nutrient foramina in the first metatarsals in normal and hallux valgus feet: location and surgical implications”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 25(3):234–240 (2003)
- [233] Mont MA, Jones LC and Hungerford DS: “Nontraumatic osteonecrosis of the femoral head: ten years later”. *JBJS* 88(5):1117–1132 (2006)
- [234] Moriishi T, Fukuyama R, Ito M, Miyazaki T, Maeno T, Kawai Y, Komori H and Komori T: “Osteocyte network; a negative regulatory system for bone mass augmented by the induction of Rankl in osteoblasts and Sost in osteocytes at unloading”. *PloS one* 7(6):e40143 (2012)
- [235] Morishita S, Sai K, Maeda S, Kuwahara-Otani S, Minato Y and Yagi H: “Distribution of Pacini-Like Lamellar Corpuscles in the Vascular Sheath of the Femoral Artery”. *The Anatomical Record* 301(11):1809–1814 (2018)
- [236] Mulisch M and Welsch U: *Romeis-mikroskopische Technik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2015)
- [237] Mullender M, Tan SD, Vico L, Alexandre C and Klein-Nulend J: “Differences in osteocyte density and bone histomorphometry between men and women and between healthy and osteoporotic subjects”. *Calcified tissue international* 77(5):291–296 (2005)
- [238] Munuera PV, Polo J and Rebollo J: “Length of the first metatarsal and hallux in hallux valgus in the initial stage”. *International orthopaedics* 32(4):489–495 (2008)

- [239] Murlimanju B, Prabhu LV, Pai MM, Yadav A, Dhananjaya K and Prashanth K: “Neurovascular foramina of the human clavicle and their clinical significance”. *Surgical and radiologic anatomy* 33(8):679–682 (2011)
- [240] Murlimanju B, Prashanth K, Prabhu LV, Chettiar GK, Pai MM and Dhananjaya K: “Morphological and topographical anatomy of nutrient foramina in the lower limb long bones and its clinical importance”. *The Australasian medical journal* 4(10):530 (2011)
- [241] Murlimanju B, Prashanth K, Prabhu LV, Saralaya VV, Pai MM and Rai R: “Morphological and topographical anatomy of nutrient foramina in human upper limb long bones and their surgical importance”. *Rom J Morphol Embryol* 52(3):859–862 (2011)
- [242] Myerson M and Badekas A: “Hypermobility of the first ray.” *Foot and ankle clinics* 5(3):469–484 (2000)
- [243] Mysorekar V: “Diaphysial nutrient foramina in human long bones.” *Journal of anatomy* 101(Pt 4):813 (1967)
- [244] Mysorekar V and Nandedkar A: “Diaphysial nutrient foramina in human phalanges.” *Journal of Anatomy* 128(Pt 2):315 (1979)
- [245] Nagel A: “The clinical significance of the nutrient artery.” *Orthopaedic review* 22(5):557–561 (1993)
- [246] Narayanamurthy V, Winston AT and Gupta A: “A rare case of Pacinian corpuscle neuroma”. *Canadian Journal of Plastic Surgery* 13(1):43–45 (2005)
- [247] Neary M, Jones R, Sunshin K, Van Manen W and Youngberg R: “Avascular necrosis of the first metatarsal head following Austin osteotomy: a follow-up study.” *The Journal of foot and ankle surgery: official publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons* 32(5):530–535 (1993)
- [248] Nery C, Barroco R and Ressio C: “Biplanar chevron osteotomy”. *Foot & ankle international* 23(9):792–798 (2002)
- [249] Nguyen US, Hillstrom HJ, Li W, Dufour AB, Kiel DP, Procter-Gray E, Gagnon MM and Hannan MT: “Factors associated with hallux valgus in a population-based study of older women and men: the MOBILIZE Boston Study”. *Osteoarthritis and cartilage* 18(1):41–46 (2010)
- [250] Nix S, Smith M and Vicenzino B: “Prevalence of hallux valgus in the general population: a systematic review and meta-analysis”. *Journal of foot and ankle research* 3(1):1–9 (2010)

- [251] Onishi Y, Hisato H, Maeda S, Minato Y, Kuwahara-Otani S and Yagi H: “Relationship between lamellar sensory corpuscles distributed along the upper arm’s deep arteries and pulsating sensation of blood vessels”. *Journal of Anatomy* 239(1):101–110 (2021)
- [252] Pallie W, Nishi K and Oura C: “The Pacinian corpuscle, its vascular supply and the inner core”. *Cells Tissues Organs* 77(4):508–520 (1970)
- [253] Papakonstantinou MK, Pan WR, le Roux CM and Richardson MD: “New approach to the study of intraosseous vasculature”. *ANZ Journal of Surgery* 82(10):704–707 (2012)
- [254] Pape HC and Kurtz A: *Physiologie (Silbernagl), 9. Auflage*. Thieme (2019)
- [255] Park YB, Lee KB, Kim SK, Seon JK and Lee JY: “Comparison of distal soft-tissue procedures combined with a distal chevron osteotomy for moderate to severe hallux valgus: first web-space versus transarticular approach”. *JBJS* 95(21):e158 (2013)
- [256] Patake S and Mysorekar V: “Diaphysial nutrient foramina in human metacarpals and metatarsals.” *Journal of anatomy* 124(Pt 2):299 (1977)
- [257] Pawson L, Checkosky CM, Pack AK and Bolanowski SJ: “Mesenteric and tactile Pacinian corpuscles are anatomically and physiologically comparable”. *Somatosensory & Motor Research* 25(3):194–206 (2008)
- [258] Payton CG: “The position of the nutrient foramen and direction of the nutrient canal in the long bones of the madder-fed pig”. *Journal of Anatomy* 68(Pt 4):500 (1934)
- [259] Pazzaglia U, Zarattini G, Giacomini D, Rodella L, Menti AM and Feltrin G: “Morphometric analysis of the canal system of cortical bone: an experimental study in the rabbit femur carried out with standard histology and micro-CT”. *Anatomia, histologia, embryologia* 39(1):17–26 (2010)
- [260] Pazzaglia UE, Bonaspetti G, Ranchetti F and Bettinsoli P: “A model of the intracortical vascular system of long bones and of its organization: an experimental study in rabbit femur and tibia”. *Journal of anatomy* 213(2):183–193 (2008)
- [261] Pazzaglia UE, Congiu T, Marchese M, Spagnuolo F and Quacci D: “Morphometry and patterns of lamellar bone in human Haversian systems”. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology* 295(9):1421–1429 (2012)
- [262] Pazzaglia UE, Congiu T, Marchese M and Zarattini G: “Structural pattern and functional correlations of the long bone diaphyses intracortical vascular system: investigation carried

- out with China ink perfusion and multiplanar analysis in the rabbit femur”. *Microvascular Research* 82(1):58–65 (2011)
- [263] Pazzaglia UE, Congiu T, Raspanti M, Ranchetti F and Quacci D: “Anatomy of the intracortical canal system: scanning electron microscopy study in rabbit femur”. *Clinical Orthopaedics and Related Research*® 467(9):2446–2456 (2009)
- [264] Perera A, Mason L and Stephens M: “The pathogenesis of hallux valgus”. *JBJS* 93(17):1650–1661 (2011)
- [265] Peterson DA, Zilberfarb JL, Greene MA and Colgrove RC: “Avascular necrosis of the first metatarsal head: incidence in distal osteotomy combined with lateral soft tissue release”. *Foot & ankle international* 15(2):59–63 (1994)
- [266] Petje G, Steinbock G and Schiller C: “Radiographic analysis of metatarsus primus varus: 45 feet followed 15 months after distal metatarsal osteotomy and lateral soft-tissue release”. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 68(6):567–570 (1997)
- [267] Pfeiffer S: “Variability in osteon size in recent human populations”. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists* 106(2):219–227 (1998)
- [268] Pickrell BB, Talbot SG, Costigan DC and Sampson CE: “Pacinian hyperplasia presenting with Raynaud’s phenomenon”. *Case Reports in Plastic Surgery and Hand Surgery* 6(1):148–152 (2019)
- [269] Piekarski K and Munro M: “Transport mechanism operating between blood supply and osteocytes in long bones”. *Nature* 269(5623):80–82 (1977)
- [270] Piggott H: “The natural history of hallux valgus in adolescence and early adult life”. *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume* 42(4):749–760 (1960)
- [271] Piqué-Vidal C, Solé MT and Antich J: “Hallux valgus inheritance: pedigree research in 350 patients with bunion deformity”. *The Journal of foot and ankle surgery* 46(3):149–154 (2007)
- [272] Pochatko DJ, Schlehr FJ, Murphey MD and Hamilton JJ: “Distal chevron osteotomy with lateral release for treatment of hallux valgus deformity”. *Foot & ankle international* 15(9):457–461 (1994)

- 
- [273] Podshivalov L, Holdstein Y, Fischer A and Bar-Yoseph P: “Towards a multi-scale computerized bone diagnostic system: 2D micro-scale finite element analysis”. *Communications in numerical methods in engineering* 25(6):733–749 (2009)
- [274] Premchandran D, Murlimanju B, Prabhu LV, Saralaya V, Kumari A, Rao K, Prashanth K and Rai A: “Topography and morphological anatomy of nutrient foramina in human metacarpal bones and their clinical implications”. *Clin Ter* 164(4):197–202 (2013)
- [275] Quindlen JC, Lai VK and Barocas VH: “Multiscale mechanical model of the Pacinian corpuscle shows depth and anisotropy contribute to the receptor’s characteristic response to indentation”. *PLoS computational biology* 11(9):e1004370 (2015)
- [276] Quindlen JC, Stolarski HK, Johnson MD and Barocas VH: “A multiphysics model of the Pacinian corpuscle”. *Integrative Biology* 8(11):1111–1125 (2016)
- [277] Rath B, Notermans HP, Franzen J, Knifka J, Walpert J, Frank D and Koebke J: “The microvascular anatomy of the metatarsal bones: a plastination study”. *Surgical and radiologic anatomy* 31(4):271–277 (2009)
- [278] Reina M, Lafuente G and Munuera PV: “Effect of custom-made foot orthoses in female hallux valgus after one-year follow up”. *Prosthetics and orthotics international* 37(2):113–119 (2013)
- [279] Resch S, Stenström A and Gustafson T: “Circulatory disturbance of the first metatarsal head after Chevron osteotomy as shown by bone scintigraphy”. *Foot & ankle* 13(3):137–142 (1992)
- [280] Resch S, Stenstrom A, Reynisson K and Jonsson K: “Chevron osteotomy for hallux valgus not improved by additional adductor tenotomy: a prospective, randomized study of 84 patients”. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 65(5):541–544 (1994)
- [281] Rhinelander FW: “The normal microcirculation of diaphyseal cortex and its response to fracture”. *JBJS* 50(4):784–800 (1968)
- [282] Rhinelander FW: “Tibial blood supply in relation to fracture healing”. *Clinical Orthopaedics and Related Research®* 105:34–81 (1974)
- [283] Rhodes NG, Murthy NS, Lachman N and Rubin DA: “Normal Pacinian corpuscles in the hand: radiology–pathology correlation in a cadaver study”. *Skeletal Radiology* 48(10):1591–1597 (2019)

- 
- [284] Riemann BL and Lephart SM: “The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability”. *Journal of athletic training* 37(1):71 (2002)
- [285] Roberts WH: “Lamellated corpuscles (Pacinian) in relation to the larger human limb vessels and a comparative study of their distribution in the mesentery”. *The Anatomical Record* 133(4):593–603 (1959)
- [286] Robinson A and Limbers J: “Modern concepts in the treatment of hallux valgus”. *The Journal of bone and joint surgery British volume* 87(8):1038–1045 (2005)
- [287] Roddy E, Zhang W and Doherty M: “Prevalence and associations of hallux valgus in a primary care population”. *Arthritis Care & Research: Official Journal of the American College of Rheumatology* 59(6):857–862 (2008)
- [288] Rogers WM and Gladstone H: “Vascular foramina and arterial supply of the distal end of the femur”. *JBJS* 32(4):867–874 (1950)
- [289] Roukis TS: “Percutaneous and minimum incision metatarsal osteotomies: a systematic review”. *The Journal of foot and ankle surgery* 48(3):380–387 (2009)
- [290] Rowe M, Tracey D, Mahns DA, Sahai V and Ivanusic JJ: “Mechanosensory perception: Are there contributions from bone-associated receptors?” *Clinical and experimental pharmacology and physiology* 32(1-2):100–108 (2005)
- [291] Sakuraoka E: “On the innervation of posterior abdominal wall in latter stage of human embryo”. *Archivum histologicum japonicum* 6(4):679–690 (1954)
- [292] Sammarco GJ and Idusuyi OB: “Complications after surgery of the hallux”. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 391:59–71 (2001)
- [293] Scheibert J, Leurent S, Prevost A and Debrégeas G: “The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor”. *Science* 323(5920):1503–1506 (2009)
- [294] Schenk S: “Die Osteonekrose des Fußes: Eine Übersicht”. *Journal für Mineralstoffwechsel & Muskuloskelettale Erkrankungen* 14(1):7–11 (2007)
- [295] Schneider W: “Influence of different anatomical structures on distal soft tissue procedure in hallux valgus surgery”. *Foot & ankle international* 33(11):991–996 (2012)
- [296] Schneider W: “Distal soft tissue procedure in hallux valgus surgery: biomechanical background and technique”. *International orthopaedics* 37(9):1669–1675 (2013)

- 
- [297] Schneider W, Aigner N, Pinggera O and Knahr K: “Chevron osteotomy in hallux valgus: ten-year results of 112 cases”. *The Journal of bone and joint surgery British volume* 86(7):1016–1020 (2004)
- [298] Schwalbe G: “Über die Ernährungskanäle der Knochen und das Knochenwachstum”. *Z Anat Entwickl-Gesch* 1:307–352 (1876)
- [299] Seo JH, Lee HS, Choi YR and Park SH: “Distal chevron osteotomy with lateral release for moderate to severe hallux valgus patients aged sixty years and over”. *International orthopaedics* 44(6):1099–1105 (2020)
- [300] Shapiro F and Wu JY: “Woven bone overview: Structural classification based on its integral role in developmental, repair and pathological bone formation throughout vertebrate groups”. *Eur Cell Mater* 38:137–167 (2019)
- [301] Shereff MJ, Yang QM and Kummer FJ: “Extraosseous and intraosseous arterial supply to the first metatarsal and metatarsophalangeal joint”. *Foot and ankle* 8(2):81–93 (1987)
- [302] Shibuya N, Roukis TS and Jupiter DC: “Mobility of the first ray in patients with or without hallux valgus deformity: systematic review and meta-analysis”. *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 56(5):1070–1075 (2017)
- [303] Shine L: “Incidence of hallux valgus in a partially shoe-wearing community”. *British medical journal* 1(5451):1648 (1965)
- [304] Shulman S: “Observations on the nutrient foramina of the human radius and ulna”. *The anatomical record* 134(4):685–697 (1959)
- [305] Siddiqui NA, LaPorta G, Walsh AL, Abraham JS, Beauregard S and Gdalevitch M: “Radiographic outcomes of a percutaneous, reproducible distal metatarsal osteotomy for mild and moderate bunions: a multicenter study”. *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 58(6):1215–1222 (2019)
- [306] Sim-Fook L and Hodgson A: “A comparison of foot forms among the non-shoe and shoe-wearing Chinese population”. *JBJS* 40(5):1058–1062 (1958)
- [307] Simons P, Klos K, Loracher C, Skulev HK, Gras F, Hofmann GO and Fröber R: “Lateral soft-tissue release through a medial incision: anatomic comparison of two techniques”. *Foot and Ankle Surgery* 21(2):113–118 (2015)
- [308] Singh I: “Variations in the metacarpal bones”. *Journal of anatomy* 93(Pt 2):262 (1959)

- [309] Singh I: "Variations in the metatarsal bones". *Journal of Anatomy* 94(Pt 3):345 (1960)
- [310] Singla A, Kalsi G, Masih N, Gupta T and Sharma M: "Morphological and topographical anatomy of nutrient foramina in human metacarpals and their surgical importance". *Surgical and Radiologic Anatomy* 39:1227–1233 (2017)
- [311] Şirin E, Kandemir C, Yılmaz B, Özdemir G, Akakin D and Muratlı HH: "Histopathological Evaluation of Mechanoreceptors in the Metatarsophalangeal Joint Capsule in Hallux Valgus". *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 59(3):518–521 (2020)
- [312] Sissons H: "The organization of bones. By P. Lacroix. Translated from the amended French edition by Dr Steward GILDER. 8 1/2x5 in. Pp. viii+ 236, with 87 figures. 1951. London: J. & A. Churchill Ltd. Price 25s". *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume* 33(4):652–652 (1951)
- [313] Siu RWH, Liu JHP, Man GCW, Ong MTY and Yung PSH: "Avascular necrosis of the first metatarsal head in a young female adult: A case report and review of literature". *World Journal of Clinical Cases* 9(25):7445 (2021)
- [314] Sivaraaj KK and Adams RH: "Blood vessel formation and function in bone". *Development* 143(15):2706–2715 (2016)
- [315] Skedros JG, Knight AN, Clark GC, Crowder CM, Dominguez VM, Qiu S, Mulhern DM, Donahue SW, Busse B, Hulsey BI *et al.*: "Scaling of Haversian canal surface area to secondary osteon bone volume in ribs and limb bones". *American Journal of Physical Anthropology* 151(2):230–244 (2013)
- [316] Skoták M and Behounek J: "Scarf osteotomy for the treatment of forefoot deformity". *Acta Chirurgiae Orthopaedicae et Traumatologiae Cechoslovaca* 73(1):18–22 (2006)
- [317] Spalteholz W: *Über das Durchsichtigmachen von menschlichen und tierischen Präparaten und seine theoretischen Bedingungen, nebst Anhang: Über Knochenfärbung*. S. Hirzel (1914)
- [318] Spencer PS and Schaumburg HH: "An ultrastructural study of the inner core of the Pacinian corpuscle". *Journal of neurocytology* 2(2):217–235 (1973)
- [319] Stamatis ED, Huber MH and Myerson MS: "Transarticular distal soft-tissue release with an arthroscopic blade for hallux valgus correction". *Foot & ankle international* 25(1):13–18 (2004)

- [320] Standop J, Ulrich A, Schneider MB, Andrén-Sandberg Å and Pour PM: “Pacinian corpuscle in the human pancreas”. *Pancreas* 23(1):36–39 (2001)
- [321] Standring S and Gray’s Anatomy E: *Book: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Elsevier Health Sciences (2015)
- [322] Stark B, Carlstedt T, Hallin R and Risling M: “Distribution of human Pacinian corpuscles in the hand: a cadaver study”. *The Journal of Hand Surgery: British & European Volume* 23(3):370–372 (1998)
- [323] Stephens MM: “Pathogenesis of hallux valgus”. *Foot and Ankle Surgery* 1(1):7–10 (1994)
- [324] Stoj VJ, Adalsteinsson JA, Lu J, Berke A and Lipner SR: “Pacinian corpuscle hyperplasia: A review of the literature”. *International Journal of Women’s Dermatology* 7(3):335–341 (2021)
- [325] Stout S, Brunsten B, Hildebolt C, Commean P, Smith K and Tappen N: “Computer-assisted 3D reconstruction of serial sections of cortical bone to determine the 3D structure of osteons”. *Calcified tissue international* 65(4):280–284 (1999)
- [326] Stout SD and Paine RR: “Histological age estimation using rib and clavicle”. *American Journal of Physical Anthropology* 87(1):111–115 (1992)
- [327] Stukenborg-Colsman C: “Hallux valgus”. *Der Orthopäde* 46(5):387–387 (2017)
- [328] Stukenborg-Colsman C, Claassen L, Ettinger S, Yao D, Lerch M and Plaaß C: “Distale Korrekturosteotomie zur Behandlung des Hallux valgus (Chevron-Osteotomie)”. *Der Orthopäde* 46(5):402–407 (2017)
- [329] Sugai N, Cho KH, Murakami G, Abe H, Uchiyama E and Kura H: “Distribution of sole Pacinian corpuscles: a histological study using near-term human feet”. *Surgical and Radiologic Anatomy* 43(7):1031–1039 (2021)
- [330] Suger G: “Minimal-invasive Verfahren in der Vorfußchirurgie”. *Fuss und Sprunggelenk* 2(11):57–58 (2013)
- [331] Tanaka Y, Takakura Y, Kumai T, Samoto N and Tamai S: “Radiographic analysis of hallux valgus. A two-dimensional coordinate system.” *JBJS* 77(2):205–213 (1995)
- [332] Thomas RL, Espinosa FJ and Richardson EG: “Radiographic changes in the first metatarsal head after distal chevron osteotomy combined with lateral release through a plantar approach”. *Foot & ankle international* 15(6):285–292 (1994)

- [333] Thompson AJ and Griffin MJ: “Effect of the magnitude and frequency of hand-transmitted vibration on finger blood flow during and after exposure to vibration”. *International archives of occupational and environmental health* 82(9):1151–1162 (2009)
- [334] Thompson FM and Coughlin MJ: “The high price of high-fashion footwear”. *J Bone Joint Surg Am* 76(10):1586–1593 (1994)
- [335] Thomsen M, Sabo D, Thomas M, Suger G and Erdle C: “Operative Therapie—1. Strahl”. In *Vorfußchirurgie*, pages S.53–56, S.62–68. Springer (2010)
- [336] Tomlinson RE and Silva MJ: “Skeletal blood flow in bone repair and maintenance”. *Bone research* 1(1):311–322 (2013)
- [337] Tonogai I, Wada K, Higashino K, Fukui Y and Sairyō K: “Location and direction of the nutrient artery to the first metatarsal at risk in osteotomy for hallux valgus”. *Foot and Ankle Surgery* 24(5):460–465 (2018)
- [338] Torkki M, Malmivaara A, Seitsalo S, Hoikka V, Laippala P and Paavolainen P: “Surgery vs orthosis vs watchful waiting for hallux valgus: a randomized controlled trial”. *Jama* 285(19):2474–2480 (2001)
- [339] Trnka HJ, Krenn S and Schuh R: “Minimally invasive hallux valgus surgery: a critical review of the evidence”. *International orthopaedics* 37(9):1731–1735 (2013)
- [340] Trnka HJ, Zembsch A, Wiesauer H, Hungerford M, Salzer M and Ritschl P: “Modified Austin procedure for correction of hallux valgus”. *Foot & ankle international* 18(3):119–127 (1997)
- [341] Turner CH, Forwood M, Rho JY and Yoshikawa T: “Mechanical loading thresholds for lamellar and woven bone formation”. *Journal of bone and mineral research* 9(1):87–97 (1994)
- [342] Tuttle RS and McCLEARY M: “Mesenteric baroreceptors”. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 229(6):1514–1519 (1975)
- [343] Uchiyama E, Kitaoka HB, Luo ZP, Grande JP, Kura H and An KN: “Pathomechanics of hallux valgus: biomechanical and immunohistochemical study”. *Foot & ankle international* 26(9):732–738 (2005)
- [344] van Oers RF, Ruimerman R, van Rietbergen B, Hilbers PA and Huiskes R: “Relating osteon diameter to strain”. *Bone* 43(3):476–482 (2008)

- [345] Varga I, Nosál M and Babál P: “Ectopic lamellar Pacinian corpuscle within the thymus. Atypical or abnormal location?” *Romanian Journal of Morphology and Embryology* 61(1):273 (2020)
- [346] Vatsa A, Breuls RG, Semeins CM, Salmon PL, Smit TH and Klein-Nulend J: “Osteocyte morphology in fibula and calvaria—is there a role for mechanosensing?” *Bone* 43(3):452–458 (2008)
- [347] Vatsa A, Smit TH and Klein-Nulend J: “Extracellular NO signalling from a mechanically stimulated osteocyte”. *Journal of Biomechanics* 40:S89–S95 (2007)
- [348] Vega JA, García-Suárez O, Montaña JA, Pardo B and Cobo JM: “The Meissner and Pacinian sensory corpuscles revisited new data from the last decade”. *Microscopy research and technique* 72(4):299–309 (2009)
- [349] Velkes S, Ganel A, Nagris B and Lokiec F: “Chevron osteotomy in the treatment of hallux valgus.” *The Journal of foot surgery* 30(3):276–278 (1991)
- [350] Vernois J and Redfern DJ: “Percutaneous Surgery for Severe Hallux Valgus.” *Foot and ankle clinics* 21(3):479–493 (2016)
- [351] Vijayaraghavan R, Chandrashekar R, Belagavi C and Murthy NB: “Painful digital Pacinian corpuscle hyperplasia following dog bite: a case report”. *International Journal of Surgery* 6(6):e42–e45 (2008)
- [352] Viladot A: “Metatarsalgia due to biomechanical alterations of the forefoot”. *Orthopedic Clinics of North America* 4(1):165–178 (1973)
- [353] Viladot A and Viladot A: “Osteochondroses: aseptic necrosis of the foot”. *Disorders of the foot and ankle ed2 Philadelphia: Saunders* pages 617–638 (1991)
- [354] Volkmann Rv: “Zur Histologie der Caries und Ostitis. Arch. f. klin”. *Chirurg Bd* 4:1863 (1863)
- [355] Waizy H, Bouillon B, Stukenborg-Colsman C, Claaßen L, Danniilidis K, Plaaß C and Arbab D: “Soft tissue techniques in hallux valgus surgery”. *Der Orthopade* 46(5):434–439 (2017)
- [356] Waizy H, Panahi B, Dohle J and Stukenborg-Colsman C: “The Current S2e Guideline for Hallux valgus—Evidence-based Guideline Development Using Meta-analysis”. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 157(01):75–82 (2019)

- [357] Waldecker U: “Lateral release in hallux valgus surgery: comparison of two approaches”. *Foot and ankle surgery* 10(4):195–199 (2004)
- [358] Wanivenhaus A and Pretterklieber M: “First tarsometatarsal joint: anatomical biomechanical study”. *Foot & Ankle* 9(4):153–157 (1989)
- [359] Watson EC and Adams RH: “Biology of bone: the vasculature of the skeletal system”. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine* 8(7):a031559 (2018)
- [360] Weiner S and Wagner HD: “The material bone: structure-mechanical function relations”. *Annual review of materials science* 28(1):271–298 (1998)
- [361] Weinraub GM, Meberg R and Steinberg JS: “Vascular perfusion of the long dorsal arm versus chevron osteotomy: a cadaveric injection study”. *The Journal of foot and ankle surgery* 43(4):221–224 (2004)
- [362] Welsch U and Deller T: *Histologie-Das Lehrbuch*. Elsevier Health Sciences (2022)
- [363] Wilde FR: “The perivascular neural pattern of the femoral region”. *British Journal of Surgery* 39(154):97–105 (1951)
- [364] Wilkinson S, Jones R, Sisk L, Sunshein K and Van Manen J: “Austin bunionectomy: post-operative MRI evaluation for avascular necrosis.” *The Journal of foot surgery* 31(5):469–477 (1992)
- [365] Wilson J: “Oblique displacement osteotomy for hallux valgus”. *The Journal of bone and joint surgery British volume* 45(3):552–556 (1963)
- [366] Wirth CJ and Arnold J: *Fuß; Orthopädie und Chirurgische Orthopädie*. ISBN 9783131262417. Thieme, Stuttgart, S.187-189 (2002)
- [367] Woollard H and Weddell G: “The composition and distribution of vascular nerves in the extremities”. *Journal of Anatomy* 69(Pt 2):165 (1935)
- [368] Wu X, Song W, Zheng C, Zhou S and Bai S: “Morphological study of mechanoreceptors in collateral ligaments of the ankle joint”. *Journal of orthopaedic surgery and research* 10(1):1–7 (2015)
- [369] Xue Z, Ding H, Hu C, Xu H and An Z: “An anatomical study of the nutrient foramina of the human humeral diaphysis”. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research* 22:1637 (2016)

- [370] Yamashita E and Buendia N: “Functional relation of Pacinian corpuscle to vascular system”. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine* 96(2):119–126 (1968)
- [371] Yassin M, Bowirat A and Robinson D: “Percutaneous surgery of the forefoot compared with open technique—functional results, complications and patient satisfaction”. *Foot and Ankle Surgery* 26(2):156–162 (2020)
- [372] Ye Y and Griffin MJ: “Reductions in finger blood flow in men and women induced by 125-Hz vibration: association with vibration perception thresholds”. *Journal of Applied Physiology* 111(6):1606–1613 (2011)
- [373] Ye Y and Griffin MJ: “Reductions in finger blood flow induced by 125-Hz vibration: effect of area of contact with vibration”. *European journal of applied physiology* 113(4):1017–1026 (2013)
- [374] Zelená J: *Nerves and mechanoreceptors: the role of innervation in the development and maintenance of mammalian mechanoreceptors*. Springer Science & Business Media (1994)
- [375] Zhao K, Zhang F, Quan K, Zhu B, Li G and Mei J: “Insufficient blood supply of fovea capitis femoris, a risk factor of femoral head osteonecrosis”. *Journal of orthopaedic surgery and research* 16(1):1–6 (2021)
- [376] Zirngibl B, Grifka J, Baier C and Götz J: “Hallux valgus”. *Der Orthopäde* 46(3):283–296 (2017)

# Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Filler für die Betreuung und Übernahme dieser Arbeit bedanken. Der stetige Austausch und die konstruktiven Impulse bei gleichzeitigem Freiraum für meine Ideen sind nicht selbstverständlich und schätze ich sehr. Danke für die kollegiale Kommunikation und Inspiration von Beginn an bis hin zur Fertigstellung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr. med. Pilge danke ich für die Begleitung und Bewertung dieser Arbeit aus klinischer Sicht. Für die monatelange Arbeit im Labor und die stetige Unterstützung bei allen Methoden und Arbeitsschritten möchte ich mich bei Frau Andrea Paas und Herrn Robert Kubitza bedanken. Der freundliche Umgang und die durch sie geschaffene Atmosphäre haben den praktischen Teil dieser Arbeit mit einem stets positiven Gefühl begleitet und vorangebracht. Herrn Felix Springer danke ich im Zuge dessen für die vielen Momente voller Frohsinn zwischen Paraffinschnitten und Objektträgern. Ich danke Frau Sabine Wittschonke, Frau Yvonne Möller und Herrn Marco Warten, durch die die Arbeit mit Körperspenden erst möglich wird. Herrn Patrick Brzoska, Herrn Dennis Malenica danke ich für die große Hilfe bei jeglichen technischen Hürden und Tücken. Ihre Expertise gepaart mit einem freundschaftlichen Umgang hat die Zeit im Labor unvergessen gemacht. Für die stetige und schnelle Hilfe mit der Schreibsoftware Latex gilt mein Dank Herrn Stephan Schmidt. Frau Opfermann-Rüngeler danke ich ganz herzlich für die Visualisierung der Ideen und Ergebnisse dieser Arbeit auf höchstem Niveau. Für die Einführung in die Welt der Bildbearbeitung mit imageJ und die gemeinsamen Stunden vor dem Bildschirm danke ich Frau Laura Jacobi. Frau Alina Wild danke ich für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Einen kritischen, philosophischen Austausch rundum wissenschaftliches Arbeiten, der hoffentlich niemals enden wird, ermöglichte mir Herr Julian Quabs. Herrn Niklas Christoph Griffel danke ich kurzum für alles.

Katharina Klütting