

**Aus der
Radiologischen Universitätsklinik Tübingen
Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie**

**Normalanatomie der A. nutricia tibiae und ihr Einfluss auf die
Entstehung von Pseudarthrosen nach Unterschenkelfraktur**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Armoutsis, Eleftherios**

2024

Dekan:	Prof. Dr. Bernd Pichler
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Fabian Springer
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Dr. Michael Krimmel
Tag der Disputation:	20.02.2024

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
1.1	Hintergrund und Begriffsbestimmung.....	7
1.2	Tibiafrakturen.....	9
1.2.1	Epidemiologie.....	9
1.2.2	Klassifikation.....	12
1.2.3	Therapie allgemein	16
1.2.4	Marknagelung	17
1.2.5	Gestörte Frakturheilung (Pseudarthrose)	20
1.3	Blutversorgung der Tibia.....	25
1.3.1	Allgemeines	25
1.3.2	Anatomie	26
1.3.3	Versorgungsarterie (A. nutricia)	28
1.4	Zielsetzung.....	34
2	PATIENTEN UND METHODEN	35
2.1	Studiendesign	35
2.2	Patienten	35
2.3	Ein- und Ausschlusskriterien	35
2.4	Multiplanare Reformation	37
2.5	Bildgebung.....	38
2.6	Anatomische Messgrößen	38
2.7	Statistik	41

3	ERGEBNISSE	42
3.1	Patientenkollektiv	42
3.2	Anzahl und Lage der Foramina.....	43
3.3	Tibiallänge und verschiedene anatomische Foramina-Parameter.....	49
4	DISKUSSION	57
4.1	Hintergrund	57
4.2	Anzahl der tibialen Foramina	59
4.3	Lage der tibialen Foramina (horizontal)	61
4.4	Anguläre Lage der tibialen Foramina	62
4.5	Lage der tibialen Foramina (vertikal)	64
4.6	Länge tibialen Kanals der A. nutricia (NAC).....	73
4.7	Schlussfolgerung und Ausblick.....	77
5	ZUSAMMENFASSUNG	83
6	LITERATURVERZEICHNIS	85

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
AF	Äußeres Foramen; externes Foramen
ANTK	Arteria nutricia tibialer Kanal
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
CTA	Computertomografie-Angiografie
EF	Externes Foramen = AF
FI	Foraminal Index
IF	Inneres; internes Foramen
Lok.	Lokalisation
M.	Musculus
MPR	Multiplanare Reformation
MW	Mittelwert
NAC	Nutritional Artery Canal
OR	Odds Ratio
P	p-Wert
SD	Standardabweichung
SL	Solar Line (Linea solaris)
TNAC	Tibial Nutrient Artery Canal
vs.	versus
Z. n.	Zustand nach

The preservation of the blood supply to the bone fragments and the soft tissue required an atraumatic surgical technique. Over time, this principle had risen in importance and it concerns both the treatment of soft tissues as well as any bone fragments and their vascularity.

Jean-Pierre Jeannet (2019) in *Leading an Surgical Revolution*, Seite 67

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Begriffsbestimmung

Der skelettalen Blutversorgung kommt ein hoher Stellenwert bei der Physiologie und Pathophysiologie des Knochengewebes zu. Neben der Stabilität stellt sie einen wichtigen Stützpfiler für die Frakturheilung dar. Etwa zwei Drittel der tibialen Blutversorgung werden durch die Nutritionsarterie - die A. nutricia tibialis - gewährleistet. Daneben nehmen aber auch die periostalen und die epi-metaphysealen Blutgefäße eine tragende Rolle ein (Paar et al. 2000). Es ist naheliegend und bereits seit langem bekannt, dass eine operative Versorgung von Frakturen, unter Schonung der anatomischen Strukturen im Allgemeinen und der Gefäßsysteme im Besonderen, den Heilungsverlauf günstig beeinflusst (Menck et al. 1992a). Dies gilt ganz besonders für die Tibia, da diese über geringere Gefäßreserven verfügt als andere lange Röhrenknochen (McMillan und Johnstone 2017).

Gegenstand dieser Untersuchung waren die nutritiven Foramina der Tibia, im englischen Sprachgebrauch als *nutrient foramen* bezeichnet. Es handelt sich hierbei um die kleinen Öffnungen am Knochenschaft, durch welche die Ernährungsarterie (A. nutricia) von peripher in den Markraum eintritt, um im Inneren die medulläre Blutversorgung bzw. deren Versorgung mit Nährstoffen zu gewährleisten (daher die Bezeichnung nutritiv). Da solche Gefäße bereits makroskopisch sichtbar sind, stellen sie einfach zu identifizierende Landmarken an den Oberflächen der langen Röhrenknochen dar (Murlimanju et al. 2011; Pereira et al. 2011; Mazenganya und Fasemore 2015; Agrawal et al. 2016; Mazenganya und Billings 2016) (Abb. 1).

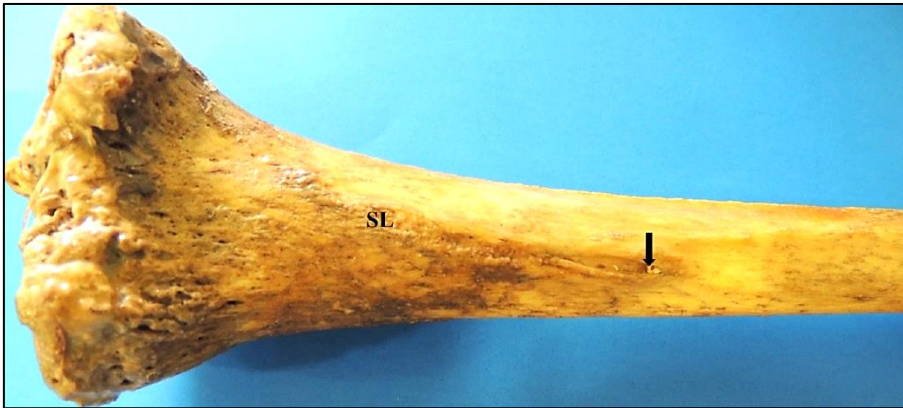


Abb. 1: Äußeres Foramen der A. nutricia an der Tibia (Pfeil).

SL = Linea solaris. Quelle: Ankolekar et al. (2013).

1.2 Tibiafrakturen

1.2.1 Epidemiologie

Frakturen des Unterschenkels gehören neben Unterarmfrakturen zu den häufigsten Lokalisationen. Bei etwa jeder fünften Fraktur ist nach Angaben von Meisinger et al. die Tibia betroffen (Meisinger et al. 2002). Zur aktuellen Epidemiologie von Tibia-Frakturen liegen allerdings nur spärliche Daten vor; außerdem wurde meist nicht das gesamte Spektrum untersucht (z.B. nur proximale Frakturen). Fundierte Daten aus Europa sind jedoch z.B. aus dem schwedischen Fraktur-Register verfügbar. Gemäß dieser Angaben liegt die Inzidenz bei 52 pro 100.000 Personen jährlich, bei ansteigender Tendenz für Frauen. Unter den 1.371 Frakturen, die im 5-Jahreszeitraum erfasst wurden, handelte es sich um 712 proximale Tibiafrakturen, 417 Schaftfrakturen und 242 distale Frakturen (Inzidenz: 26,9 bzw. 15,7 bzw. 9,1 pro 100.000) (Wennergren et al. 2018).

Larsen et al. gaben die Inzidenz von Schaftfrakturen der Tibia mit 16,9 pro 100.000 an, wobei Männer häufiger betroffen waren (21,5 pro 100.000). Bei dieser Gruppe dominierte im Übrigen die Altersgruppe zwischen 10 und 20 Jahren. Bei Frauen lag die Inzidenz bei 12,3. Am häufigsten waren hier die 30- bis 40-Jährigen betroffen. Das mittlere Alter der Männer und Frauen betrug 32,8 und 48,6 Jahre (Gesamt: 38,5 Jahre). Mit etwa einem Drittel (34 %) wurde der Typ 42-A1 als häufigste Schaftfraktur identifiziert (Larsen et al. 2015) (Abb. 2). In einer zuvor durchgeführten Erhebung aus England wurde für Tibiaschaftfrakturen eine etwas höhere Inzidenz von 21,5 pro 100.000 ermittelt (Court-Brown und Caesar 2006).

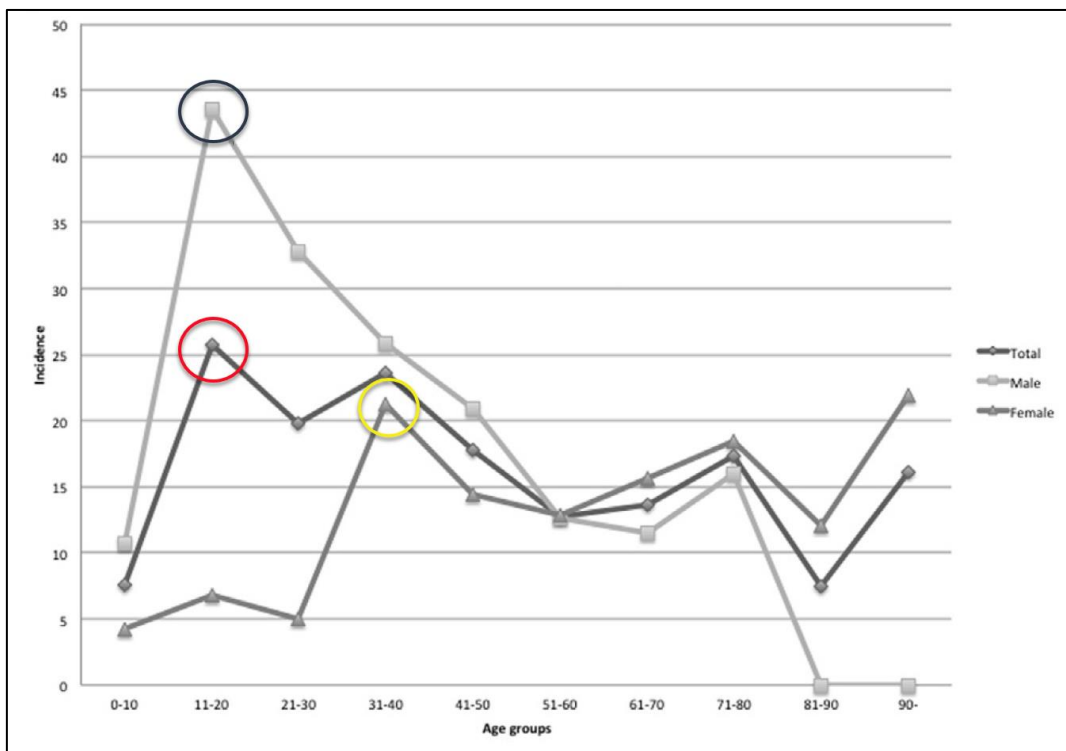


Abb. 2: Inzidenz von tibialen Schaftfrakturen bei Frauen und Männern.

Roter Kreis: Altersgipfel männlich; gelb: weiblicher Altersgipfel; schwarz: gesamt.
Quelle: Larsen et al. (2015).

Es wird erkennbar, dass der Altersgipfel bei den männlichen Patienten deutlich früher auftritt als bei den Frauen.

Im Hinblick auf die geschlechtsspezifischen Unterschiede ist außerdem bemerkenswert, dass proximale Frakturen der Tibia und Schaftfrakturen bei Frauen im Alter ab 70 bis 80 Jahren eine deutliche Zunahme aufweisen, währenddessen bei den Männern ab dem mittleren Alter ein konstanter Inzidenzverlauf vorliegt (proximal) oder sogar eine abnehmende Inzidenz zu beobachten ist (Schaftfrakturen) (Abb. 3). Im Hinblick auf distale Frakturen finden sich solche Unterschiede allerdings nicht; sowohl bei Männern als auch Frauen steigt die Inzidenz im höheren Alter stark an (Wennergren et al. 2018).

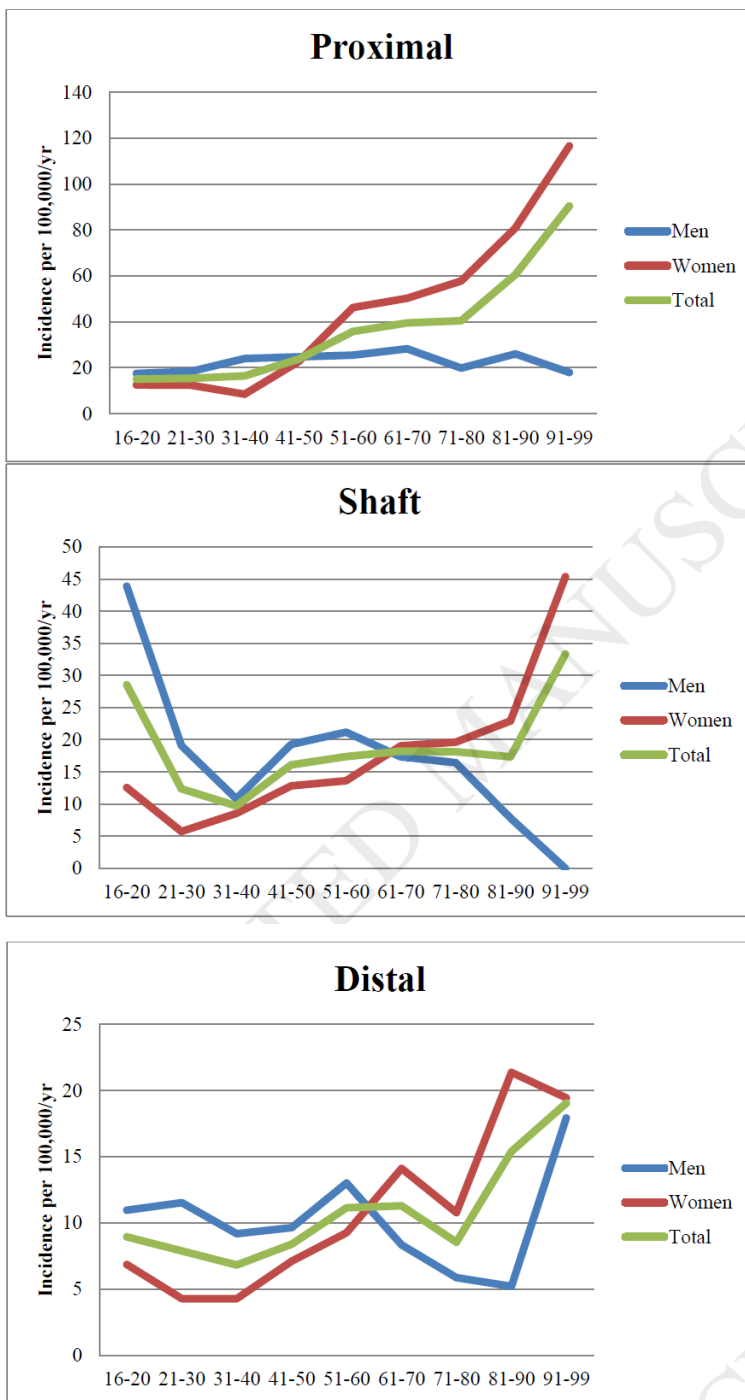


Abb. 3: Inzidenz der Tibia-Frakturen bei Frauen und Männern im Vergleich.

Quelle: Wennergren et al. (2018).

Proximale und diaphysäre Frakturen der Tibia weisen bei **Frauen** im Alter einen deutlichen Anstieg auf, der bei **Männern** nicht zu beobachten ist. Dafür treten bei jungen Männern Schaftfrakturen bis zu etwa 4-mal häufiger auf als bei jungen Frauen.

Aufgrund der noch immer stark zunehmenden Überalterung der westlichen Bevölkerung ist allgemein mit einer Zunahme von Frakturen zu rechnen, was sowohl für Frakturen im Allgemeinen als auch für Tibiafrakturen im Besonderen zutrifft. Vor diesem Hintergrund sind auch viele der epidemiologischen Daten nicht mehr ganz korrekt, da deren Erhebung oft 20 oder sogar 30 Jahre zurückliegt (Wennergren et al. 2018).

Zusammenfassend kann ausgeführt werden, dass Frakturen der Tibia bei den langen Röhrenknochen zu den häufigsten Frakturen gehören. Die Inzidenz wird mit etwa 25 pro 100.000 Personen jährlich angegeben. Besonders hoch ist sie beim jungen männlichen Geschlecht zwischen 15 und 19 Jahren, wo eine Inzidenz von über 100 pro 100.000 erreicht wird. Das mittlere Alter beim Auftreten einer Tibia-Schaftfraktur liegt bei 37 Jahren; Männer sind dabei mit durchschnittlich 31 Jahren jünger als Frauen mit 54 Jahren (Egol et al. 2018).

1.2.2 Klassifikation

Es liegt eine Reihe an Klassifikationen vor, um Frakturen näher zu beschreiben bzw. einzuteilen. Eine weit verbreitete und gebräuchliche ist die AO-Klassifikation, die von der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) im Jahr 1987 veröffentlicht wurde. Frakturen werden hierbei mittels alpha-nummerischem Code definiert. Zunächst wird der Knochen oder die Knochenregion mit einer Ziffer kodiert, wobei den langen Röhrenknochen der Code 1 bis 4 zugeordnet wird (1: Humerus; 2: Radius/Ulna; 3: Femur; 4: Tibia/Fibula). Danach erfolgt die Kodierung des Segmentes (1: proximal; 2: diaphysär; 3: distal) (Harder und Kuster 2011) (Abb. 4).

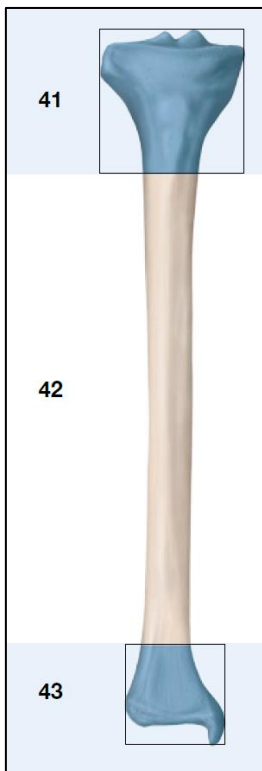


Abb. 4: Segment-Einteilung der Tibia.

Die proximalen und distalen Anteile stellen ein Quadrat dar, das sich aus der jeweiligen maximalen Breite ergibt. Der Bereich dazwischen entspricht dem Schaft (Wennergren 2019).

Nachfolgend ist beispielhaft die Kodierung für Frakturen des Tibiaschafts nach AO-Klassifikation dargestellt (Abb. 5).

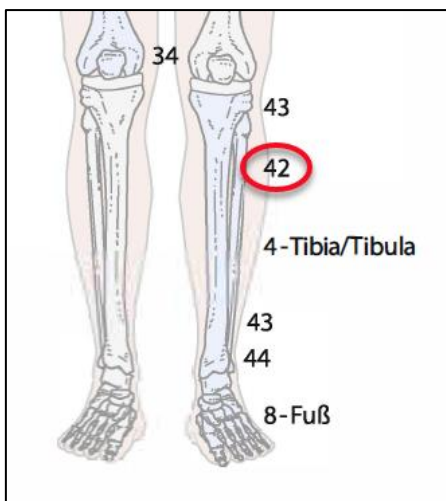


Abb. 5: Kodierung der anatomischen Lokalisation.

AO-System; 42 = 4 für Tibia und 2 für diaphysär.

Quelle: Harder und Kuster (2011).

Die dritte Stelle des Codes dokumentiert bei proximalen oder distalen Frakturen (43 oder 44) den Schweregrad bzw. das Maß der Gelenkbeteiligung (Typ A bis C; A: extraartikuläre

Frakturen; B: partiell intraartikuläre Frakturen; C: vollständig intraartikuläre Frakturen)
(Abb. 6).

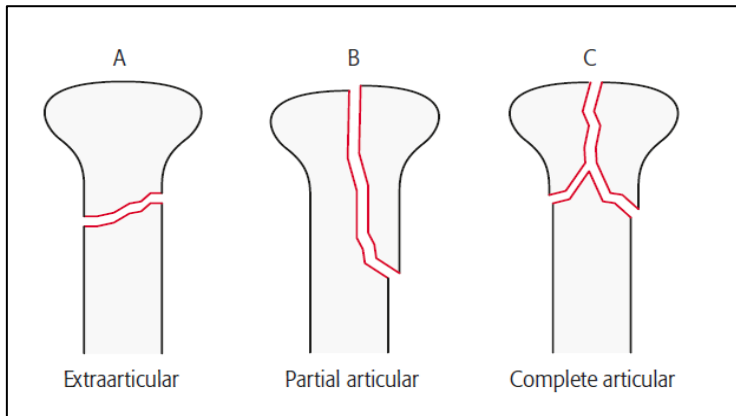


Abb. 6: Schweregrad bzw. Ausmaß der Gelenkbeteiligung bei proximalen und distalen Frakturen.

Quelle: Meinberg et al. (2018)-

Die Einteilung des Schweregrades (Typ: A bis C) sowie Subtyp (1 bis 3) für Schaftfrakturen ist in der folgenden Grafik dargestellt (Abb. 7).

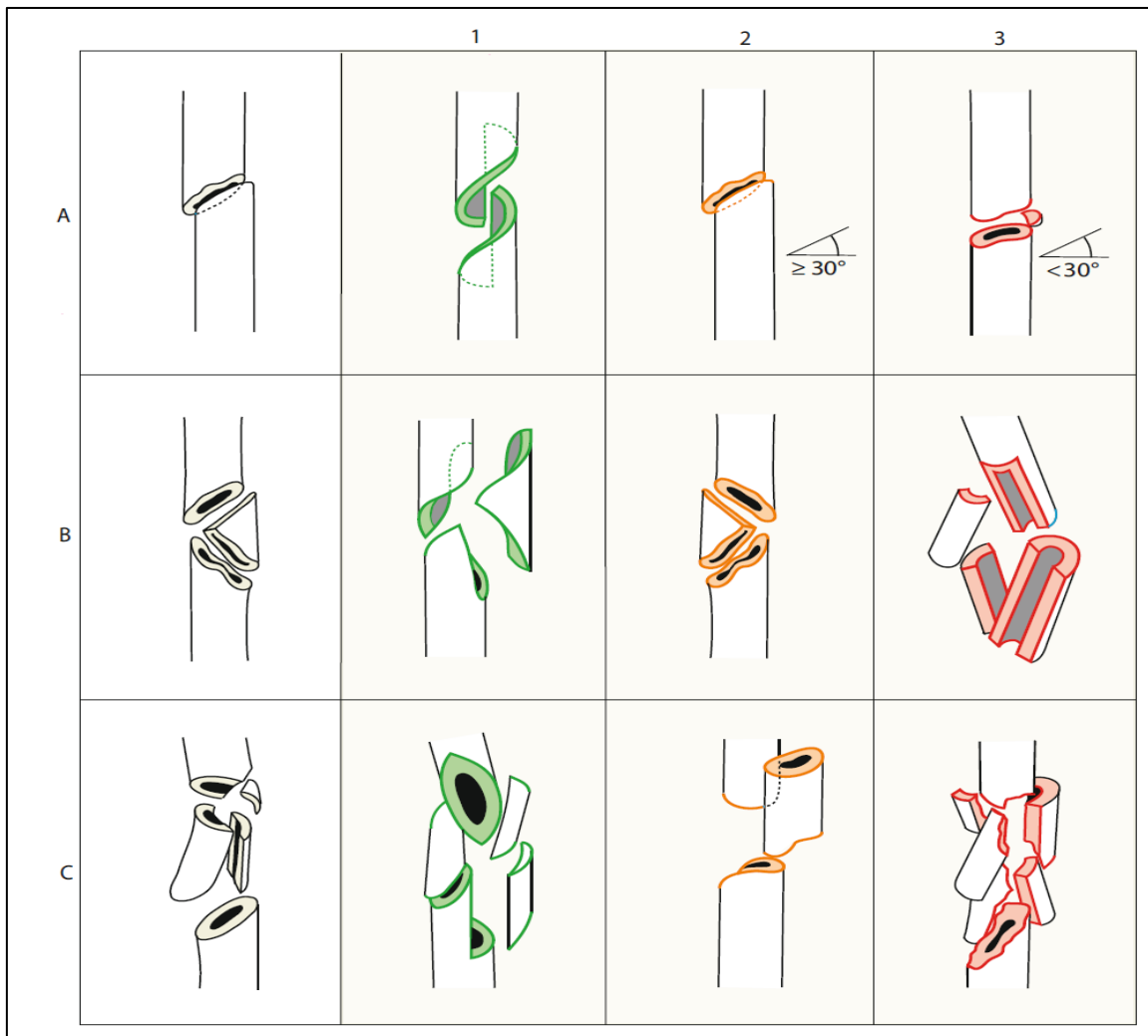


Abb. 7: Klassifikation der diaphysären Tibiafrakturen.

AO-Klassifikation der Region 42 Unterschenkelschaftfrakturen: **A)** Tibiadiaphyse: A1: Spiralförmige Fraktur; A2: Schrägfraktur; A3: Querfraktur. **B)** Tibiadiaphyse, Keilfraktur: B1: Drehkeil; B2: Biegungskeil; B3: Keilfragment. **C)** Tibiadiaphyse, Komplexfraktur: C1: Spiralförmige Fraktur; C2: Etagenförmige Fraktur; C3: Irreguläre Fraktur.

Quelle: Müller-Mai und Frank (2015).

Mit einem Anteil von 34 % kommt unter den Schaftfrakturen der Tibia am häufigsten der Typ A1 vor (42-A1) (Larsen et al. 2015).

Nachfolgend ist zur Veranschaulichung und Übersicht nochmals die AO-Kodierung in zusammengefasster Form dargestellt (Harder und Kuster 2011) (Abb. 8).

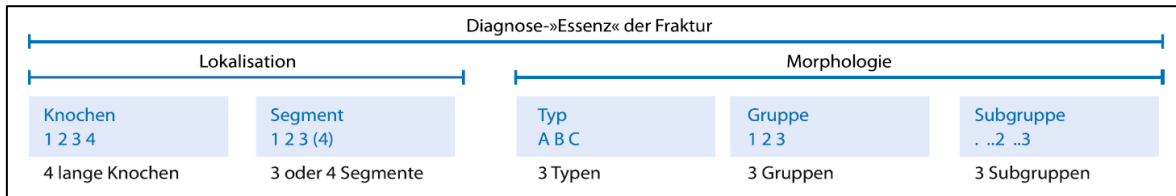


Abb. 8: Alpha-nummerische Struktur der AO-Klassifikation für lange Röhrenknochen.

Quelle: Harder und Kuster (2021).

1.2.3 Therapie allgemein

Tibiaschaftfrakturen werden meist operativ behandelt (Busse et al. 2008). Eine gute Compliance vorausgesetzt kann jedoch bei nicht-dislozierten Frakturen des Tibiaschaftes auch eine konservative Behandlung in Erwägung gezogen werden (Bode et al. 2012). Hierbei ist jedoch das höhere Risiko von tiefen Beinvenenthrombosen oder Kompartment-Syndromen zu berücksichtigen. Außerdem weisen solche Interventionen das größte Risiko für verzögerte Knochenheilungen und Pseudarthrosen auf (Bode et al. 2012). Abgesehen davon gehen operative Verfahren in der Regel mit einem höheren Patientenkomfort einher. Ferner ist meist auch eine raschere Wiedereingliederung in Alltag und Beruf möglich, was sowohl den Komfort verbessert als auch die Kosten reduziert (Mayr 2002).

Zur chirurgischen Therapie von Tibiafrakturen stehen grundsätzlich drei Optionen zur Verfügung: (1) Versorgung mittels intramedullärem Nagel; (2) Versorgung mittels externem Fixateur; (3) Stabilisierung mittels Platten. Welches Verfahren das Optimum darstellt lässt sich nicht eindeutig bestimmen. Die Wahl hängt im Übrigen auch von den Vorlieben des Operateurs sowie von den Wünschen und Vorstellungen der Patienten ab. Eine Rolle spielt dabei auch, ob eine maximal stabile Fixierung notwendig ist, was etwa bei jungen und aktiven Patienten der Fall sein kann. Davon abgesehen sollte die ideale Behandlung eine adäquate Stabilität gewährleisten, um den Patienten möglichst früh mobilisieren zu können.

Außerdem sollte die Fraktur-Biologie möglichst wenig gestört bzw. möglichst weit unterstützt werden, um den Heilungsverlauf nicht zu gefährden. Ferner sollte das Risiko schwerer Komplikationen möglichst gering sein, ebenso das Problem der Narbenbildung. Und zu guter Letzt sollten der Eingriff und die Nachbehandlung auch kosteneffektiv sein (Lin et al. 2018).

Bei der Tibia handelt es sich im Übrigen um einen besonderen Röhrenknochen. Es liegen hier die längsten Heilungszeiten vor. Während diese bei Humerus und Femur etwa 4 bis 12 Wochen betragen, beträgt die Dauer nach Tibiafrakturen 10 bis 24 Wochen. Die Heilungsdauer ist hierbei stark vom Alter bzw. den Komorbiditäten abhängig (Zimmermann 2017).

Vor diesem komplexen Hintergrund wird die Frage zum Behandlungs-Prozedere bei Tibiaschaftfrakturen oft kontrovers diskutiert, wobei eine starke Tendenz zur intramedullären Nagelung besteht. Vorteil der Nagelung ist, dass sie eine sehr große Stabilität aufweist, vor allem beim aufgebohrten Verfahren. Die Platten-Osteosynthese spielt bei Schaftfrakturen meist nur noch eine untergeordnete Rolle (Mayr 2002; Bode et al. 2012; Märdian et al. 2015). (Mayr 2002).

1.2.4 Marknagelung

Das Verfahren der Marknagelung (innere Schienung der Fraktur) wurde in den 1930er Jahren von Gerhard Küntscher an der Universitätsklinik in Kiel entwickelt und im Jahr 1940 in einer Publikation vorgestellt. Vorausgegangen waren Versuche an Tieren, wobei Küntscher in der 1940er-Publikation nunmehr auch über den Einsatz am Menschen berichtete. Als Vorteil wurden die erhaltende Beweglichkeit und die zeitnahe Belastung nach dem Eingriff benannt, was durch die gute Stabilität der Fraktur erreicht werden konnte. Küntscher führt aus, dass „die durch die Verletzung verloren gegangene Festigkeit (...) wiederhergestellt (wird), und „dass der Knochen als Ganzes betrachtet durch Einführung eines solchen Stahlnagels oft sogar fester wie [sic] vor dem Bruch (wird)“ (Küntscher 1940). Bemerkenswert scheint, dass Küntscher sein Verfahren ausdrücklich nicht als operative Frakturbehandlung

gewertet haben wollte, da der Nagel entfernt von der Bruchstelle eingeführt wird bzw. die Bruchstelle nicht eröffnet werden muss (Güntz 1944).

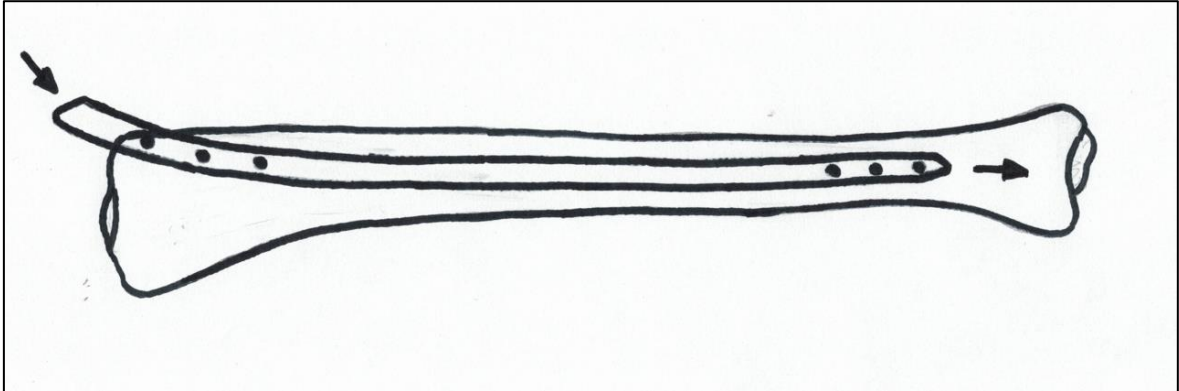


Abb. 9: Schematische Darstellung der Tibia Marknagelung.

Wenige Jahre später wurde das Verfahren jedoch kritisiert und eine zurückhaltende Anwendung empfohlen, da die Ergebnisse nicht zufriedenstellend waren. Grund dafür waren zu dünne und zu instabile Nägel (Böhler 1963). Dies führte schließlich zum Prinzip der Aufbohrung, wodurch der Einsatz von Marknägeln mit größerem Durchmesser ermöglicht wurde (Küntscher 1959). Küntscher selbst hatte ab 1950 eine routinemäßige Aufbohrung angeraten (Pfister 2010).

Das Verfahren blieb allerdings umstritten und wurde von einzelnen führenden Orthopäden und Unfallchirurgen sogar vehement abgelehnt. Abgesehen davon sollen zwischen 1940 und 1980 etwa zwei Millionen Patienten mit dem Küntscher-Nagel behandelt worden sein (Lentz 1980).

In den 1990er Jahren wurde von der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese (AO) schließlich die Technik der unaufgebohrten Nagelung wieder aufgegriffen und weiterentwickelt (hin zum Verriegelungsnagel, bei dem die Enden des Nagels gegen Verdrehung gesichert werden). Zunächst diente dieser Nagel als Alternative zum Fixateur externe. Heute wird die Technik der unaufgebohrten Nagelung eher als Alternative zur Aufbohrung betrachtet. Im

Vordergrund der neuen Entwicklungen stand dabei die Absicht, die Schädigung der Kortikalis und die Störung der enostalen Durchblutung zu vermindern, wie sie im Zuge der Aufbohrung nicht zu vermeiden sind. Außerdem sollte das Einschwemmen von Fett- und Knochenpartikeln in den Blutkreislauf und in die Lunge verhindert oder zumindest reduziert werden (Attal und Blauth 2010).

Das mechanische Prinzip des unaufgebohrten Mark- bzw. Verriegelungsnagels ist die intramedulläre Schienung. Anders als bei der aufgebohrten Nagelung findet keine Verklebung statt. Die verwendeten Nägel weisen einen geringeren Durchmesser auf, der sich nach dem kleinsten Durchmesser des Markraumes richtet. Aus diesem Grund ist die Stabilität des Implantat-Knochen-Konstrukts geringer. Erhöhte Raten an verzögerten Knochenheilungen bis hin zu Pseudoarthrosen sind die Folge (Attal und Blauth 2010).

Da bei der unaufgebohrten Marknagelung der Aufwand für die Vorbereitung geringer ist (keine Bohrung notwendig), ist die Operationsdauer kürzer. Aufgrund des schonenderen Vorgehens in Verbindung mit der kürzeren OP-Dauer ist auch der Blutverlust geringer. Außerdem ist die Schädigung der enostalen Blutversorgung geringer, was der Knochenheilung entgegenkommt. Die Vor- und Nachteile sind nachfolgend weiter aufgeführt (Attal und Blauth 2010) (Tab. 1).

Tab. 1: Vor- und Nachteile der unaufgebohrten Marknagelung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Schonung der enostalen Durchblutung▪ Keine thermische Schädigung der Kortikalis▪ Geringe Fett- und Mediatoreneinschwemmung▪ Verkürzte Operationszeit▪ Geringerer Blutverlust	<ul style="list-style-type: none">▪ Intramedulläre Schienung ohne Verklebung▪ Geringe Eigenstabilität▪ Erhöhte Rate an verzögerten Heilungen und Pseudoarthrosen▪ Materialbruch

Quelle: Attal und Blauth (2010).

Bei den Marknägeln handelt es sich übrigens in den meisten Fällen nicht (mehr) um solide Gebilde im Sinne einer Stange, sondern vielmehr um Röhren oder Schienen. Ziel dabei ist

es, die ‚Nägel‘ möglichst gewebeschonend einbringen zu können. Durch die hohle Röhrenform kann zum Beispiel der Druck beim Einschlagen reduziert werden. Dem Problem der Gefäßschädigung versucht man durch die Anpassung der Form (z.B. dreieckig) entgegenwirken zu können (Abb. 10).



Abb. 10: Marknägel; verschiedene Designs.

Quelle: www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2010/daz-32-2010/durch-mark-und-bein [JUL 2022].

1.2.5 Gestörte Frakturheilung (Pseudarthrose)

Bei der Knochen- bzw. Frakturheilung handelt es sich insofern um einen einzigartigen Prozess, als dass eine Regeneration ohne Narbenbildung stattfindet. Es laufen Prozesse ab, die der embryonalen Skelettentwicklung sehr ähnlich sind. Ähnliches ist für kein anderes humanes Gewebe bekannt (Einhorn und Gerstenfeld 2015).

Sofern keine Komplikationen auftreten, heilt eine Fraktur folglich spontan oder nach Osteosynthese innerhalb von drei bis vier Monaten im Sinne einer vollständigen Wiederherstellung aus. Erfolgt die Knochenheilung erst innerhalb von vier bis sechs Monaten, liegt per

Definition eine verzögerte Knochenheilung vor (delayed union). Sollte auch nach sechs bis acht Monaten keine Frakturheilung zustande gekommen sein, wird dies als Pseudarthrose bezeichnet (engl.: non-union) (Harder und Kuster 2011). Bei dieser Definition ist zu berücksichtigen, dass eine Zunahme des Kallus bei einer hypertrophen Pseudarthrose noch keine Frakturheilung bedeutet. Dies stellt vielmehr den Versuch des Knochens dar, die exzessive Beweglichkeit im Frakturspalt auszugleichen (Harder und Kuster 2011) (Abb. 11).

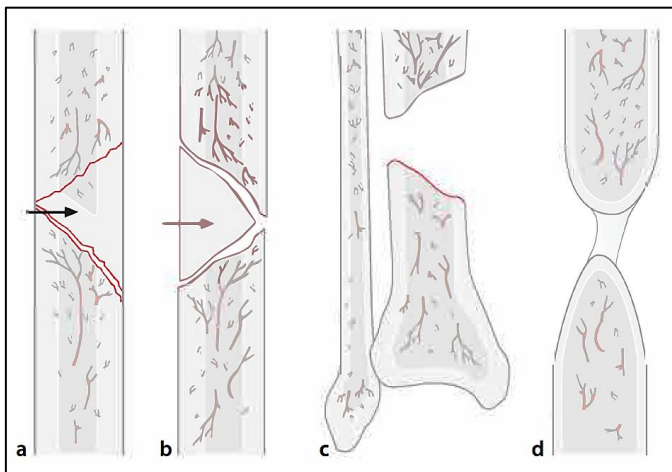


Abb. 11: Avitale Pseudarthrose.

a, b: Devitalisierter Knochen-bereich, der durch lokale Deperiostierung oder Ausschluss aus dem durchbluteten Frakturverbund ‚toter‘ Knochen erzeugt; c, d Defekt: die biologischen Voraussetzungen können derart geschädigt sein, dass eine knöcherne Überbrückung der Frakturenden spontan nicht mehr möglich ist; lokale Durchblutung und vitale Knochensubstanz genügen den Anforderungen nicht (Harder und Kuster 2011).

Posttraumatische Pseudarthrosen sind die Folge einer gestörten Frakturheilung. Zu deren ätiologischen Faktoren gehören unter anderem (Harder und Kuster 2011):

- Lokalisation der Fraktur (Diaphyse/Metaphyse)
- Frakturtyp (hohe Energie, offene Fraktur)
- Weichteilschäden
- patientenspezifische Faktoren (Allgemeinzustand)

Hinsichtlich der Pathogenese von Pseudarthrosen lassen sich drei Typen unterscheiden: Die hypertrophe, die oligotrophe und die atrophische Form, wobei die Heilungsphase mindestens sechs Monate betragen haben muss. Bei einem Intervall von vier bis sechs Monaten spricht man von einer verzögerten Frakturheilung (Neumair und Biberthaler 2017).

Bei der hypertrophen Pseudarthrose liegt eine überschießende Kallusbildung vor, ohne dass es zu einer Konsolidierung der Knochenfragmente kommt. Bei der oligotropen Form ist die Kallusbildung nicht ausreichend, um eine stabile Verbindung der Fragmente zu schaffen. Im Falle einer atrophischen Pseudarthrose findet keine Knochenneubildung statt und die Kallusbildung ist nicht vorhanden (Neumair und Biberthaler 2017) (Abb. 12).

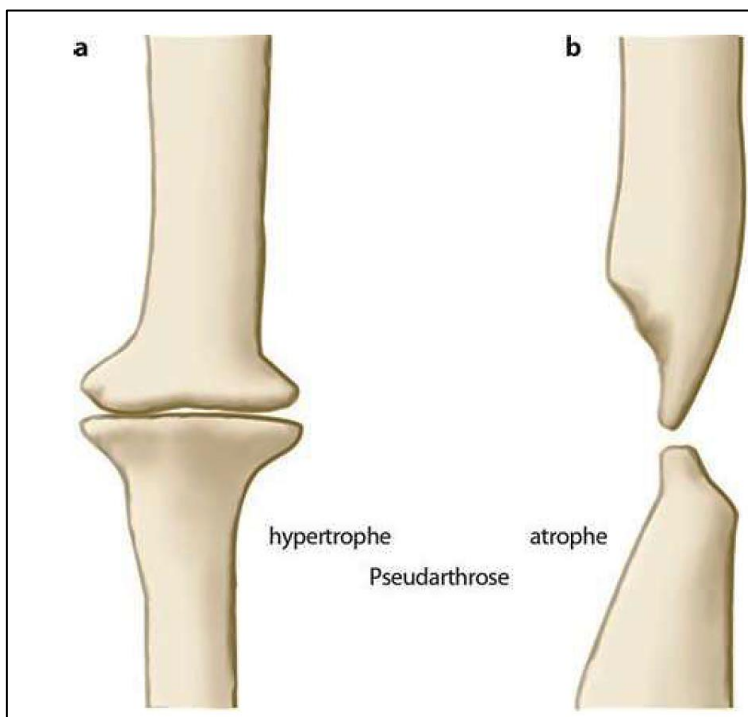


Abb. 12: Einteilung der Pseudarthrosen nach dem biologischen Verhalten.

Quelle: Neumair und Biberthaler (2017).

Eine besondere Bedeutung kommt der nutritiven Versorgung im Frakturbereich zu. Gefäßverletzungen und ein Kompartmentsyndrom können zu schweren Durchblutungsstörungen

führen. Iatrogene Faktoren, wie Operationstechnik (Weichteilbehandlung, Deperiostierung, Hitzeentwicklung beim Aufbohren vor Marknagelung), Blutsperre und die Implantatwahl, können sich negativ auf die Durchblutung auswirken. Eine bereits traumatisch bedingte Knochennekrose kann durch derartige Faktoren noch verstärkt werden und zur Pseudarthrose führen. So ist z.B. eine distale Tibiafraktur unter einem dünnen Weichteilmantel mit spärlicher Durchblutung besonders pseudarthrosegefährdet (Goldhahn et al. 2000; Harder und Kuster 2011). Im Vergleich dazu ist das Femur bei dickerer Weichteilhülle und unkritischerer Durchblutung weniger gefährdet (Orler et al. 2002; Harder und Kuster 2011).

Als weitere Faktoren wurden in einer Multicenterstudie Faktoren wie Art und Morphologie der Fraktur, Lokalisation, Dauer der chirurgischen Behandlung, Frakturlücken, Art und Umfang des Weichteilschadens identifiziert. Ferner spielt auch der Mechanismus der Fraktur eine Rolle sowie Art und Umfang des vaskulären Schadens. Daneben spielen auch individuelle Faktoren wie Alter, Geschlecht, Rauchen oder Diabetes eine Rolle. In Rahmen der multivariaten Analyse zeigte sich, dass das Risiko nach Fixateur externe etwa doppelt so hoch war wie nach Marknagel-Behandlung (aufgebohrt oder unaufgebohrt) (Audigé et al. 2005).

Mittels dem Non-Union-Scoring-System (NUSS) kann das Pseudarthrose-Risiko abgeschätzt werden, wobei neben patientenspezifischen Variablen (z.B. Diabetes oder Nikotin) zahlreiche Parameter zur Qualität und Pathologie des Knochens einfließen (z.B. Art der Fraktur, Art der Therapie oder Knochenqualität) (van Basten Batenburg et al. 2019).

Eine verzögerte Knochenheilung bis hin zur Pseudarthrose kommt mit einer Häufigkeit von 5 bis 10 % vor (Tzioupis und Giannoudis 2007; Calori et al. 2011). Andere Autoren gingen von 10 bis 15 % aus; im Falle von schweren Beeinträchtigungen der lokalen Durchblutung können nach Angaben der Autoren sogar Pseudarthrose-Raten von bis zu 50 % beobachtet werden (Bahney et al. 2015). In einer Studie aus Australien lag die Rate bei 8,1 % (lange Röhrenknochen) (Ekegren et al. 2018); bei Tibiaschaftfrakturen wurde anhand retrospektiver Daten aus den USA eine Prävalenz von 12 % festgestellt. Die Verzögerung der Frakturheilung war hierbei mit etwa zwei- bis dreifach höheren Behandlungskosten verbunden. Hinsichtlich der Kosten ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei Patienten mit verzögerter

Wundheilung meist auch ein schwereres Krankheitsbild (offene oder multiple Fraktur) oder eine stärkere Komorbidität vorliegt, so dass die Behandlungskosten per se bereits höher sind. So weisen Patienten mit verzögerter Knochenheilung mehr als doppelt so oft eine offene Fraktur auf. Davon abgesehen sind die Kosten für die notwendigen Interventionen, insbesondere bei Pseudarthrosen, hoch, da oft langwierige und wiederholte Eingriffe notwendig werden (Antonova et al. 2013). Zu berücksichtigen sind in diesem Zusammenhang außerdem die indirekten Kosten, wie sie zum Beispiel durch den Arbeitsausfall bedingt sind. Solche Kosten können sogar die reinen Behandlungskosten um ein Mehrfaches übersteigen (Hak et al. 2014).

In einer großen US-amerikanischen Kohortenstudie mit über 300.000 Frakturen wurde eine Rate von 4,9 % ermittelt. Diese waren insbesondere mit schweren Frakturen (offene oder multiple), einem hohen BMI, Alkohol- oder Zigaretten-Abusus assoziiert. Eine Rolle spielte auch die Lokalisation im Skelett, wobei die Tibia stärker betroffen war als andere lange Röhrenknochen. In der multivariaten Analyse erwiesen sich insbesondere die Arthrose, die rheumatoide Arthritis und der Diabetes mellitus als stärkere Risikofaktoren (OR 1,40 – 1,45). Unter den Medikamenten als potenzielle Risikofaktoren fielen vor allem NSAR und Opioiden auf, die das Pseudoarthrose-Risiko ebenfalls um mindestens 40 % erhöhten (Zura et al. 2016).

1.3 Blutversorgung der Tibia

1.3.1 Allgemeines

Ein intaktes Gefäßsystem ist für lange Röhrenknochen wie die Tibia von entscheidender Bedeutung für deren metabolische Versorgung (Sauerstoff, Nährstoffe, regulatorische Gewebefaktoren) sowie die Entsorgung (CO₂ und andere Abfallprodukte), die Hämatopoese, das Wachstum und die Regeneration nach Schädigungen (Clarke 2008; Marenzana und Arnett 2013; Anetai et al. 2021).

Insbesondere bei der Fraktur bzw. der Frakturheilung spielt die Blutversorgung eine wesentliche Rolle, indem sie zur Knochenresorption (von Knochenfragmenten und überschüssigem Knochen) und zur Kallusbildung und anschließend durch den Prozess der Neoangiogenese zur Revaskularisierung an der Frakturstelle beiträgt; die Vaskularisierung trägt maßgeblich zur Entwicklung der endochondralen Verknöcherung bei (Hankenson et al. 2011; Marsell und Einhorn 2011; Santolini et al. 2014).

Im Zusammenhang mit der Blutversorgung bei Frakturen spielen auch die Osteoblasten eine wichtige Rolle. Deren Bildung und Funktion wird durch eine Hypoxie bzw. einer Verminderung des Blutflusses stark beeinträchtigt. Die dadurch bedingte Hemmung der Knochenneubildung steht der Knochenheilung diametral im Wege. Dies gilt umso mehr, als dass eine Hypoxie mit einer Vermehrung der Osteoklastenfunktion und somit der Knochenresorption assoziiert ist (Clarke 2008; Marenzana und Arnett 2013; Anetai et al. 2021). Diese Vorgänge sind auch der Grund dafür, weshalb zum Beispiel Inaktivität zum Verlust von Knochenmasse führt und nach der Versorgung von Frakturen eine möglichst rasche Mobilisierung angestrebt wird:

Inaktivität → verminderte Durchblutung → verminderter Sauerstoffpartialdruck → Inhibition der Osteoblasten → Stimulation der Osteoklasten (Guadalupe-Grau et al. 2009).

Knochenzellen wie Osteoklasten und Osteoblasten und Osteozyten machen nur etwa zwei Prozent der Knochenmasse aus. Dennoch sind sie für den Aufbau, Umbau und Abbau der gesamten Knochenmasse verantwortlich (Seubert et al. 2017).

Osteozyten sind einzelne Osteoblasten, die von der mineralisierten Knochenmatrix umschlossen werden. Die eingeschlossenen Osteoblasten differenzieren zu Zellen (Osteozyten), die kein Knochengewebe mehr bilden können. Sie fungieren aber vermutlich als Mechanorezeptoren und steuern den Auf- und Abbau der Knochenmasse. Ist die Funktion dieser Zellen gestört, weil die vaskuläre Versorgung vermindert oder unterbrochen ist, muss dies zwangsläufig auch Folgen für die Knochenheilung haben (Seubert et al. 2017).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Blutfluss eine wichtige Rolle bei den skelettalen Stoffwechselprozessen spielt, der im Allgemeinen fein abgestimmt und reguliert ist. Jede Störung von solchen Prozessen führt zu einem Ungleichgewicht zwischen den physiologischen osteogenen und osteolytischen Stimuli und somit zu einer Störung des Remodelings bei der Frakturheilung (Rubin und Lanyon 1987; Burr 2002; Seubert et al. 2017).

Die adäquate Blutversorgung ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung und Differenzierung von osteogenen Zellen (Rand et al. 1981; Green et al. 1987; Ashcroft et al. 1992).

1.3.2 Anatomie

Bei der Tibia handelt es sich um den zweitgrößten Röhrenknochen des Skeletts. In Abhängigkeit von der Körpergröße des Erwachsenen weisen Länge und Innendurchmesser eine

große Spannweite von etwa 30 bis 50 cm (bisweilen auch mehr) bzw. 8 bis 15 mm auf. Der Knochen hat eine dreieckige Form mit einem nach vorne gerichteten Scheitelpunkt. Die anteromediale Oberfläche des Schienbeins ist konkav (Matityahu und Marmor 2015; Kfuri und Belangro 2016).

Zusammen mit der Fibula bildet die Tibia das skelettale Gerüst des Unterschenkels, wobei die Knochen durch eine Membran verbunden sind. Eine Besonderheit dieses Skelettabschnitts ist, dass die Tibia nur zu zwei Drittel durch einen Weichteilmantel geschützt ist; das restliche Drittel ist anteromedial lediglich durch die Haut bedeckt, was die Tibia besonders verletzungsanfällig macht und der Grund dafür ist, dass häufig offene Frakturen auftreten (bei etwa 50 bis 60 % aller Tibiafrakturen). Bei einer gleichzeitigen Einschränkung der Blutversorgung führt dies zu einer hohen Infektionsrate sowie zu Knochenheilungsstörungen bis hin zur Pseudarthrose (Mayr 2002; Bode et al. 2012).

Die langen Röhrenknochen bestehen aus dem hohlen Schaft (Diaphyse) sowie an den beiden Enden aus Meta- und Epiphyse. Die Diaphyse ist aus kortikalem Knochen aufgebaut; sie lässt sich in eine äußere periostale und eine innere endosteale Oberfläche einteilen. Die osteoproduktive Aktivität der periostalen Oberfläche ist wichtig für das appositionelle Wachstum und die Reparatur von Frakturen. Das Knochenwachstum an der Oberfläche übersteigt in der Regel den Knochenabbau in dieser Region (Clarke 2008) (Abb. 13).

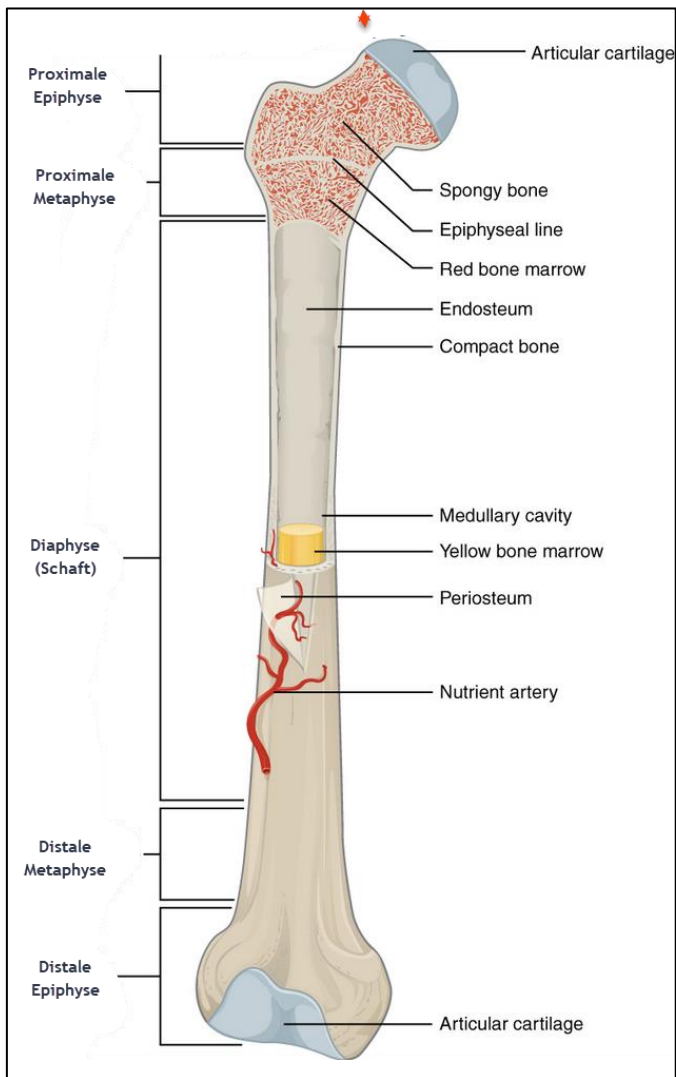


Abb. 13: Aufbau von langen Röhrenknochen.

Quelle: Modifiziert nach www.lecturio.de/magazin/knochen/ [JUL 2022].

Bisweilen wird zum Schaft (Diaphyse) auch der Bereich der Metaphysen zugerechnet, wie z.B. bei Harder und Kuster (2011).

1.3.3 Versorgungsarterie (A. nutricia)

Das Verständnis der Anzahl und Position von Gefäßen, die für die Versorgung des Knochens verantwortlich sind, ist von großer Wichtigkeit, um orthopädische Eingriffe, wie etwa die chirurgische Versorgung von Frakturen, sicher durchführen zu können. (Forriol Campos et al. 1987; Gandhi et al. 2013).

Die Blutversorgung der Tibia oder der langen Röhrenknochen im Allgemeinen kann in drei grundlegende Versorgungstypen eingeteilt werden: (1) Die medulläre Versorgung, (2) die epiphyseal-metaphyseale Versorgung und (3) die periostale Versorgung. Funktionell weisen diese drei Abschnitte Beziehungen zueinander auf, so dass die verbleibenden Systeme

in eingeschränktem Maße für einen Ausgleich untereinander sorgen können, wenn es durch Krankheit oder Unfall zu einem Ausfall einer Versorgungsquelle kommen sollte (Kelly et al. 1961).

Eine besondere Bedeutung bei der Blutversorgung der langen Röhrenknochen kommt der Versorgungsarterie (A. nutricia) zu. Während des Wachstums werden diese Knochen interossär zu 70 bis 80 % über die A. nutricia mit Blut versorgt. Einschränkungen oder Unterbrechungen haben Störungen des Wachstums zur Folge (Trueta 1953; Forriol Campos et al. 1987). Die Versorgungsarterie spielt aber auch beim Erwachsenen eine große Rolle, vor allem im Zusammenhang mit Heilungsprozessen nach Frakturen oder orthopädischen Eingriffen (Trueta 1974). Dies lässt sich bereits daran erkennen, dass 90 % des tibialen Markraums von der A. nutricia versorgt werden (Afzal et al. 2017). Andere Autoren gehen bei einem Anteil von 70 bis 80 % zwar von einer geringeren Blutversorgung des interossären Raumes aus, der Anteil ist mit 70 bis 80 % jedoch immer noch sehr groß und hebt die Bedeutung der A. nutricia bei langen Röhrenknochen hervor (Ambekar und Sukre 2016).

Die A. nutricia versorgt aber nicht nur einen Großteil des medullären Kompartiments, sondern darüber hinaus auch zwei Drittel des kortikalen Knochengewebes über das Haverskanalsystem. Die periostalen Arterien selbst erreichen lediglich das äußere Drittel und spielen für die inneren zwei Drittel der Kortikalis keine Rolle. Verletzungen der A. nutricia, wie sie infolge einer Fraktur oder aber iatrogen im Zuge der Frakturbehandlung auftreten können, sind folglich mit dem Risiko von Knochenheilungs-Störungen assoziiert (Nagel 1993; Harder und Kuster 2011; Filipowska et al. 2017). Davon abgesehen ist bei der Tibia die extraossäre Blutversorgung im Bereich der posterioren Diaphyse vergleichsweise spärlich, was im Falle einer Fraktur den Heilungsprozess zusätzlich negativ beeinflussen kann (Rhineland 1974; Trueta 1974; Borrelli et al. 2002; Almansour et al. 2020b).

Die A. nutricia tibiae entspringt aus der A. tibialis posterior und mündet im proximalen Schaftdrittels, in Höhe des Ursprungs des M. soleus, über das äußere Foramen in das Periost ein (Mayr 2002; Vadhel et al. 2015; Mohan et al. 2017). Sie kann aber in einzelnen Fällen auch aus anterioren tibialen, poplietalen oder aus fibulären Arterien hervorgehen (Santo-

lini et al. 2014; Anetai et al. 2021). Nach Eintritt in das äußere Foramen verläuft die A. nutricia anschließend auf einer Strecke von etwa 5 cm diagonal innerhalb der Kortikalis (Versorgungskanal), um danach über das innere Foramen in den Markraum zu gelangen. Im starren Bereich des knöchernen Kanals ist das Gefäß besonders anfällig für Rupturen, falls hier Frakturen auftreten, auch wenn diese nur gering disloziert sind (Rhineland 1974). Im Markraum verläuft die A. nutricia fast immer in distaler Richtung. Ausnahmen sind nur in 1 bis 2 % der Fälle zu beobachten (Gupta und Gupta 2014; Mazenganya und Fasemore 2015; Sharma et al. 2015). Im weiteren Verlauf gibt die Versorgungsarterie dann zwei bis drei Äste nach proximal, aber lediglich einen nach distal ab (Rhineland 1974; Matityahu und Marmor 2015; Anetai et al. 2021) (Abb. 14).

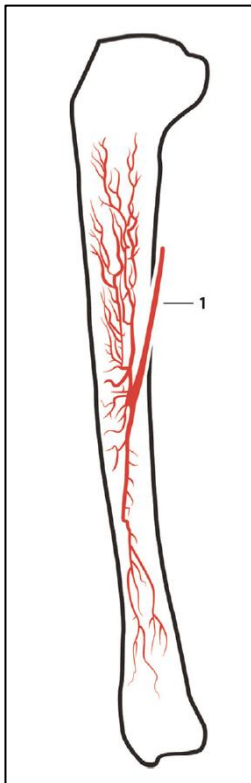


Abb. 14: Verlauf der A. nutricia in der Tibia.

In distaler Richtung findet sich zunächst nur ein einzelner Hauptast, bevor sich das Gefäß dann erst im unteren Bereich weiter aufspaltet. Die proximale Blutversorgung ist ausgeprägter (Santolini et al. 2014).

Nachfolgend ist die Eintrittspforte der A. nutricia an der nativen Tibia dargestellt (Abb. 15). Ferner ist deren Verlauf in der Abb. 18 (Methodik, S. 39) auch im radiologischen Querschnittbild wiedergegeben.

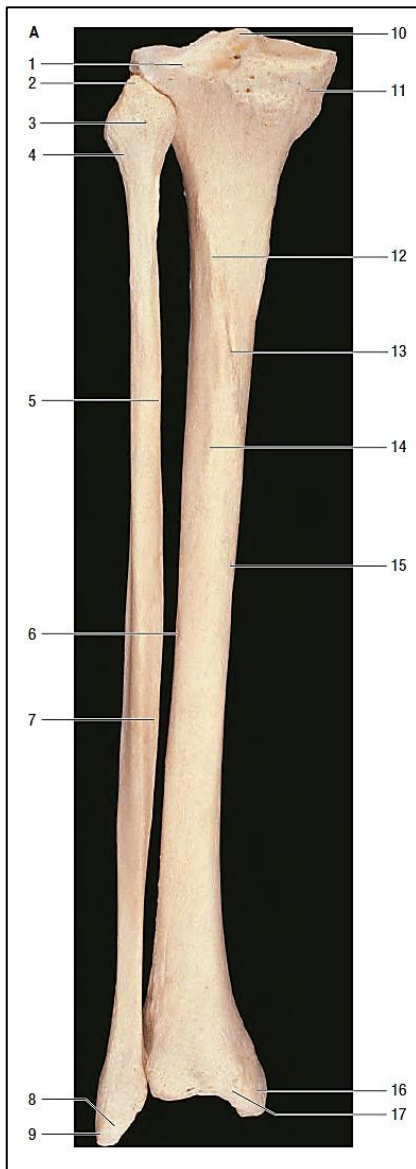


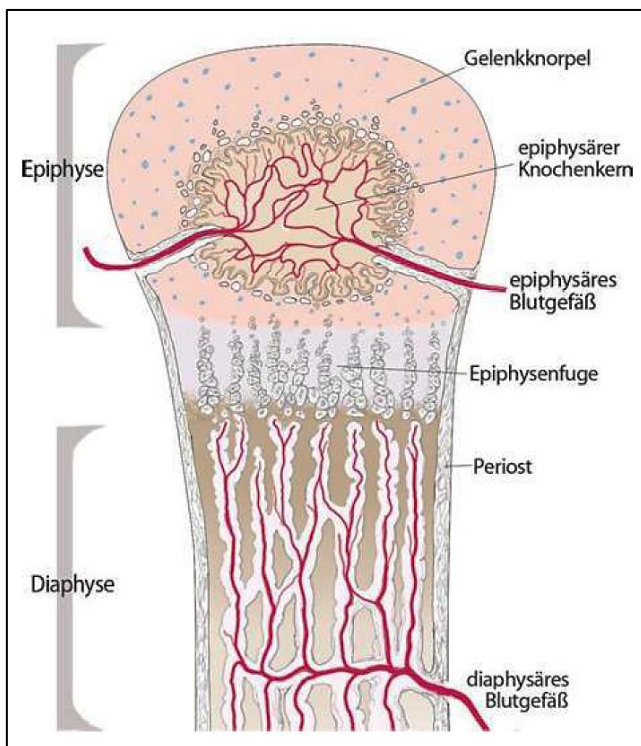
Abb. 15: Linke Tiibia mit Fibula von posterior.

12 = Linia solea (Ansatz des M. soleus)

13 = Foramen nutricum (äußeres bzw. Eintrittsforamen der A. nutricia)

Quelle: Standring (2016), S. 1403 (GRAY'S Anatomy).

Wie oben bereits beschrieben teilt sich der kurze aufsteigende Ast meist in drei aufsteigende Äste. Diese aufsteigenden Äste teilen sich in der proximalen metaphysären Region in feinere Äste auf, die mit den epiphysär-metaphysären Arterien anastomosieren. Ausfälle in diesem Bereich können folglich gegenseitig zumindest teilweise kompensiert werden (Kelly et al. 1961; Paar et al. 2000) (32).



Die Epiphyse wird über ein eigenes Gefäßsystem versorgt, ähnlich der A. nutricia im Bereich der Diaphyse. Eine relevante Verbindung zwischen den Epi- und Diaphyse liegt nicht vor. Nach Schluss der Epiphysenfuge entwickeln sich jedoch kleine Anastomosen zwischen den Knochenabschnitten. Solche Anastomosen haben vor allem dann eine klinische Bedeutung, wenn es zum Ausfall entweder der Epiphyse oder der Diaphyse (Störung der A. nutricia) kommt. Sie gleichen dann die aufgetretenen Mangelsituationen zumindest teilweise aus (Macnab und Haas 1974; Rhineland 1974; Santolini et al. 2014).

Abb. 16: Epiphysale Blutversorgung.

Quelle: Schubert und van Griensven (2017).

Vor dem Hintergrund der anatomischen Verhältnisse ist die Kenntnis der Blutversorgung und insbesondere die Lage der A. nutricia bzw. der nutritiven Foramina für die Therapieplanung bei der chirurgischen Versorgung von Frakturen von großer Bedeutung (Tejaswi et al. 2016). Dies gilt auch für andere operative Eingriffe, wie zum Beispiel Umstellungsosteotomien (Simon et al. 2020). Die Kenntnis von Lage und Verlauf der A. nutricia ist ferner auch deshalb wichtig, weil deren Kanal bei der Durchquerung der Kortikalis im konventionellen Röntgenbild, gelegentlich aber auch im CT, einer Fraktur oder Stressfraktur ähneln kann: der nutritive Kanal manifestiert sich im Röntgenbild als aufgehellte Linie, ähnlich einer Frakturlinie (Schiessel und Zweymüller 2004). Im Hinblick auf die Tibia ist dieser Aspekt besonders relevant, weil dort die meisten Stressfrakturen auftreten und diese vom Verlauf her dem Kanal der A. nutricia ähneln können; beide verlaufen quer von proximal nach distal.

Hinzu kommt, dass diese Stressfrakturen meist im oberen Drittel lokalisiert sind, was wiederum auch für das Foramen der A. nutricia zutrifft (Greaney et al. 1983; Feydy et al. 1998; Ambekar und Sukre 2016).

Unabhängig davon eignet sich das native Röntgenbild nicht dazu, um den Verlauf der A. nutricia aufzeigen zu können. In der Studie von Schiessel und Zeymüller (2004) konnte bei etwa einem Viertel der Patienten eine Aufhellungslinie beobachtet werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei den meisten Patienten im nativen Röntgenbild der Verlauf der A. nutricia nicht nachweisbar ist. Hinzu kommt, dass die Position der nutritiven Foramina bzw. der Verlauf der nutritiven Gefäße individuell unterschiedlich ist. Davon abgesehen ist das Wissen um die Lage dieser Gefäße und um deren Variationen sehr wichtig, um chirurgische Eingriffe möglichst ohne Schädigung bzw. unter maximaler Schonung der Blutversorgung durchführen zu können (Mysorekar 1967).

1.4 Zielsetzung

Eine suffiziente Blutversorgung ist für die Frakturheilung ebenso wichtig wie die Stabilität der Knochenfragmente nach der operativen Versorgung. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der A. nutricia tibiae zu. Die Kenntnis von deren Lage ist zur Durchführung von chirurgischen Interventionen von zentraler Bedeutung.

Ziel dieser Studie war es, eine detaillierte topografische Analyse des Kanals der A. nutricia (TNAC; Tibial Nutrient Artery Canal) vorzunehmen. Ferner sollten Anzahl und Lage der äußeren und inneren Foramina des TNAC präzise untersucht und beschrieben werden. Hierbei sollte auch geprüft werden, inwiefern Einflussgrößen wie das Geschlecht oder die Seitenlokalisation (rechts vs. links) eine Rolle spielen.

2 Patienten und Methoden

2.1 Studiendesign

Bei dieser Studie handelte es sich um eine retrospektive Untersuchung, die in der Abteilung für diagnostische und interventionelle Radiologie der Universitätsklinik Tübingen durchgeführt wurde. Die Studie wurde nach den ethischen Richtlinien der Institution durchgeführt. Eine Überprüfung und Genehmigung durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität, Universitätsklinikum Tübingen lag vor (Projektnummer: 430/2018).

2.2 Patienten

Es wurden die Daten von 106 konsekutiven Patienten ausgewertet, die im Zeitraum zwischen Januar und Juni 2018 aus einer klinischen Indikation heraus in der radiologischen Abteilung untersucht worden waren und bei denen eine vollständige i.v.-kontrastmittelangehobene CT-Angiografie für beide unteren Extremitäten vorlag. Mit Schichtbildaufnahmen war es möglich, neben der Vermessung des äußeren Foramens, auch Daten zum inneren Foramen des TNAC zu erheben. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit den knöchernen Verlauf der A. nutricia tibiae zu analysieren. Um mit den Daten einen Seitenvergleich durchführen zu können, schienen CT Angiografische Schnittbilder mit standardisierter Aufnahme beider unterer Extremitäten, geeignet.

2.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien:

- Alle Patienten, die im genannten Zeitraum untersucht wurden (wie oben beschrieben).

Ausschlusskriterien:

- Patienten mit Frakturen in der Vorgeschichte.
- Patienten mit Z. n. Amputation im Bereich der unteren Extremität.
- Patienten mit Gelenkersatz der unteren Extremität.
- Patienten mit inadäquater Lagerung bei der CT-Angiografie.
- Patienten mit Bewegungsartefakten
- Patienten ohne komplette multiplanare Reformation (MPR) der Bildnachbearbeitung.

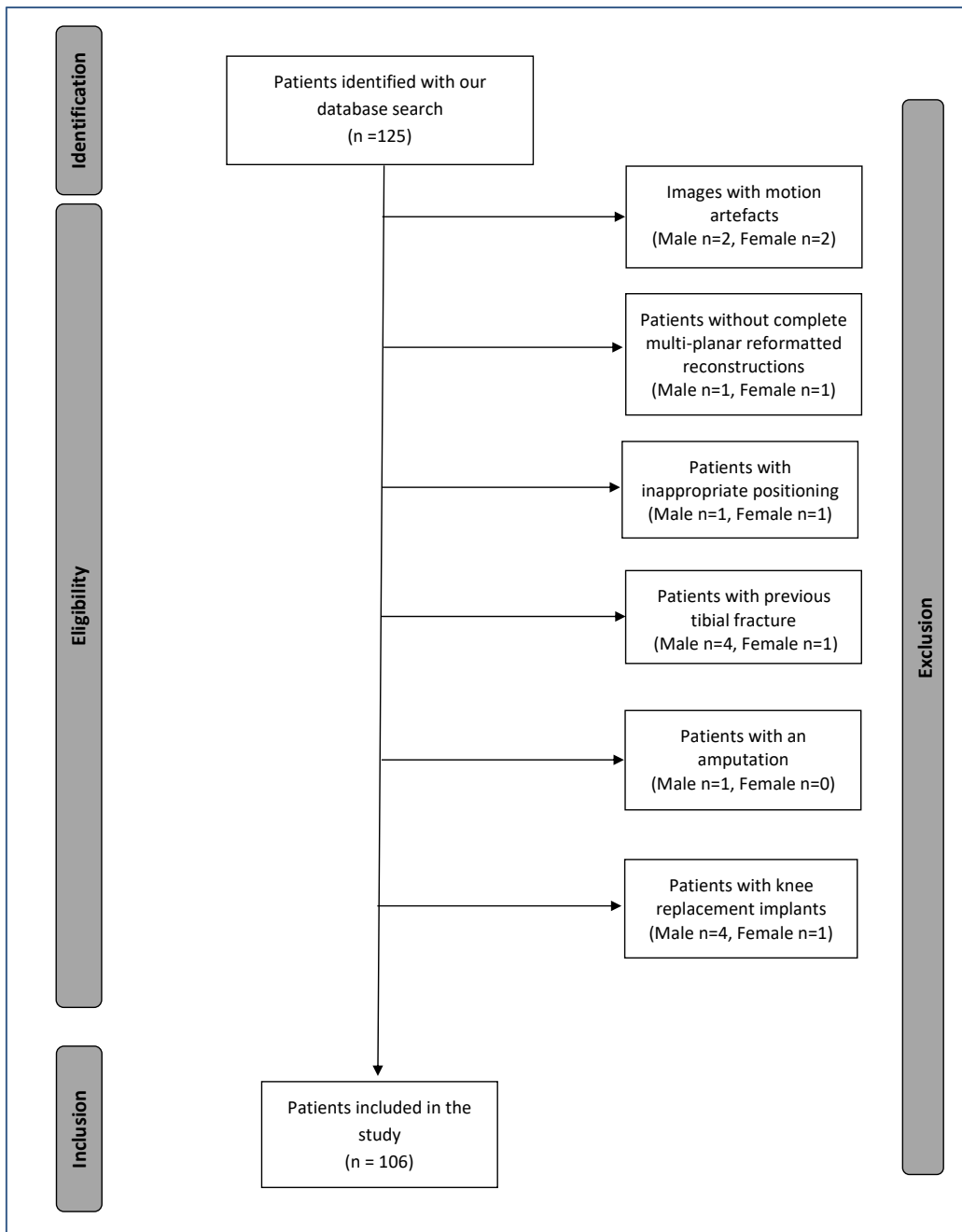


Abb. 17: Flussdiagramm der Einschluss- und Ausschluss-Kriterien.

Quelle: Almansour et al. (2020a).

2.4 Multiplanare Reformation

Die Multiplanare Reformation (MPR) stellt die empfohlene Bildnachbearbeitung der CTA von Becken und Beinen dar (Riemer 2017). Zur genauen anatomischen Beurteilung der

Tibia mit ihren Knochenkonturen und die Vermessung des Knochenkanals der tibialen Nutritionsarterie (TNAC) ist die MPR ein adäquates Mittel (Sartoris et al. 1986; Sartoris et al. 1988; Wu et al. 2010; Kim et al. 2013). Ein Vorteil der MPR für die Vermessung des TNAC ist die Möglichkeit einer anatomischen Korrektur der Datensätze, bei der geringe Lageabweichungen auf streng coronaren, sagittalen oder axialen Schichten im Nachgang korrigiert werden können. Ein Seitenvergleich des rechten und linken Unterschenkels wird somit erleichtert (Prokop 2006).

2.5 Bildgebung

Alle Patienten wurden mit einem High-End Dual-Source CT-Scanner (Definition Force, Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) untersucht. Die Aufnahmeparameter waren wie folgt: Dual-Energy-Akquisition mit 80kV/Sn150kV, Referenz mAs 118/59, Pitch 0,7. Die Bilder wurden auf einer 512 x 512-Matrix mit 3 mm Schichtdicke unter Verwendung der iterativen Rekonstruktion (ADMIRE 2, Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) rekonstruiert.

2.6 Anatomische Messgrößen

Der Knochenkanal der A. nutricia tibialis (TNAC) wurde anhand eines äußeren Foramens (proximale Eintrittspforte) und eines inneren Foramens (distale Austrittspforte) gekennzeichnet (Abb. 18).

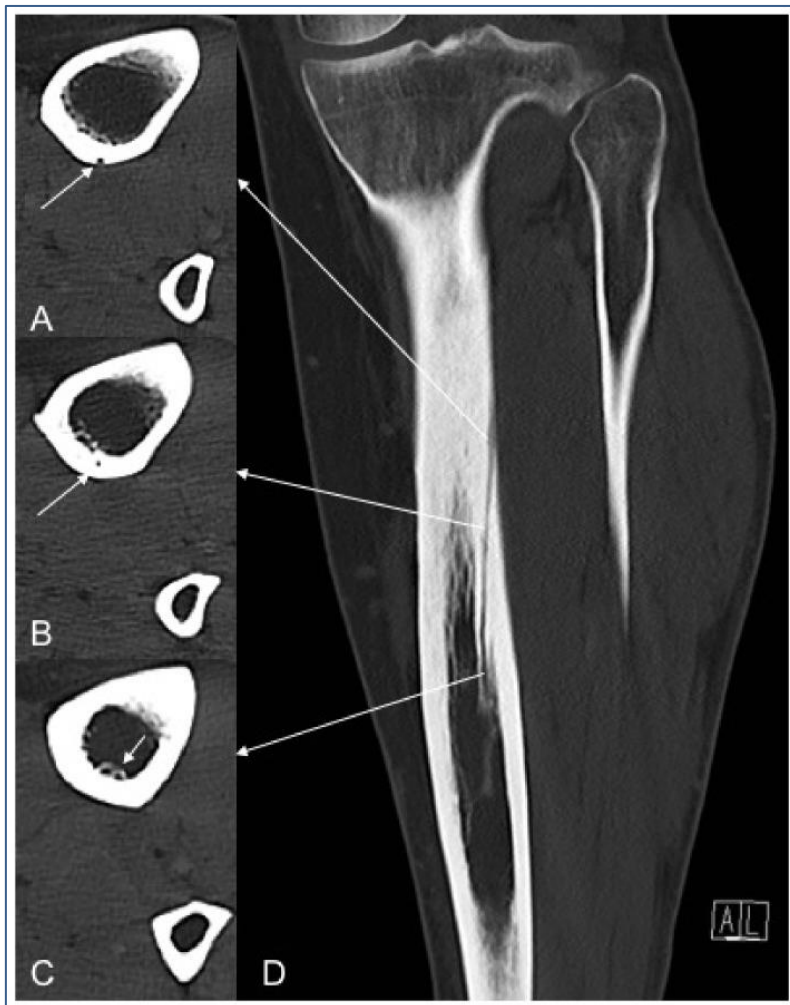


Abb. 18: Kanal der A. nutricia tibiae.

A-C: Querschnittsaufnahmen auf unterschiedlicher Höhe; A zeigt die Eintrittspforte der A. nutricia (äußeres Foramen); B zeigt deren Verlauf innerhalb der Knochenwand; C zeigt den Ausgang der A. nutricia (inneres Foramen); D: koronar neu formatiertes Bild in einem Knochenfenster, das den knöchernen Kanal A. nutricia abbildet und sowohl den Eingang (äußeres Foramen) als auch den Ausgang (inneres Foramen) erkennen lässt.

Aus den CTA-Aufnahmen wurden die folgenden morphometrischen bzw. anatomischen Parameter ermittelt:

- Anzahl der Eintrittspforten (Foramina) der A. nutricia sowie deren Lage (posterior, anterior, medial).
- Totale Tibialänge: Distanz zwischen dem proximalen tibialen Plateau und der Spitze des medialen Malleolus (distal).
- Distanz des proximalen tibialen Plateaus bis zum äußeren Foramen der A. nutricia (AF; äußeres Foramen)

- Distanz des proximalen tibialen Plateaus bis zum inneren Foramen der A. nutricia (IF; inneres Foramen).
- Länge des knöchernen Kanals der A. nutricia.
- Verhältnis von AF zur Tibiallänge in Prozent.
- Verhältnis von IF zur Tibiallänge in Prozent.
- Verhältnis Kanallänge (A. nutricia) zur Tibiallänge in Prozent.
- Anguläre Lokalisation des äußeren und inneren Foramens in Bezug zur Fibula als Referenz (Abb. 19).

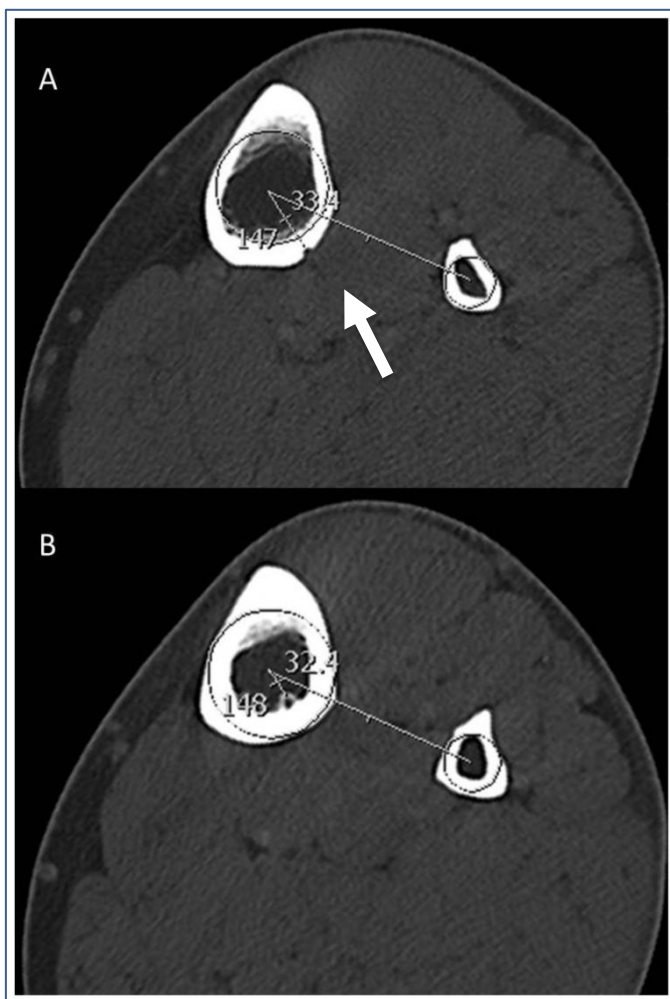


Abb. 19: Anguläre Position der Foramina.

A: Äußeres Foramen
B: Inneres Foramen

2.7 Statistik

Alle Berechnungen wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics Version 26 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen) durchgeführt.

Die errechneten Durchschnittswerte wurden als Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) angegeben; zum Teil wurden auch der Median sowie die Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Wo absolute Zahlen dargestellt wurden, findet sich auch stets eine Angabe in Prozent.

Für den Vergleich zweier Mittelwerte (zum Bsp. Frauen vs. Männer) kam der t-Test für unverbundene Stichproben zur Anwendung. Für den Seitenvergleich (rechte vs. linke Tibia) wurde der t-Test für verbundene Stichproben eingesetzt. Im Falle nicht-normalverteilter Daten wurde als nicht-parametrisches Verfahren der Mann-Whitney-Test eingesetzt.

Die Überprüfung auf Normalverteilung wurde mittels Shapiro-Wilk-Test durchgeführt.

Einfache Zahlenvergleiche wurden mit dem Chi-Quadrat-Test vorgenommen.

Analysen der Korrelation wurden nach Spearman berechnet, wobei r-Werte ab 0,5 als starke Korrelation gewertet wurden.

Das Signifikanz-Niveau wurde in allen Fällen mit $p < 0,05$ festgelegt (zweiseitig). Werte zwischen 0,5 und 0,99 wurden ggf. als Tendenz gewertet.

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Im Rahmen dieser Studie wurden die Daten von insgesamt 106 Patienten ausgewertet. Es handelte sich um 52 männliche und 54 weibliche Patienten. Das durchschnittliche Alter lag zum Zeitpunkt der Untersuchung bei $70,1 \pm 11,7$ Jahren (Median: 70,0 Jahre). Ein relevanter Unterschied zwischen den Geschlechtern war nicht vorhanden (Tab. 2).

Tab. 2: Alters- und Geschlechtsverteilung der Patienten.

	Anzahl	Prozent	Mittelwert (Jahre)	SD	Median (Jahre)	Minimum (Jahre)	Maximum (Jahre)
Männlich	52	49,1	69,3	9,6	69,5	43	87
Weiblich	54	50,9	70,8	13,4	70,5	47	100
Gesamt	106	100	70,1	11,7	70,0	43	100

SD = Standardabweichung.

* $p=0,522$ (t-Test).

Nachfolgend ist die Verteilung der Patienten in drei Altersgruppen dargestellt. Etwa die Hälfte der Patienten war über 70 Jahre alt. Jeweils etwa ein Viertel war 61 bis 70 Jahre oder maximal 60 Jahre alt (Abb. 20).

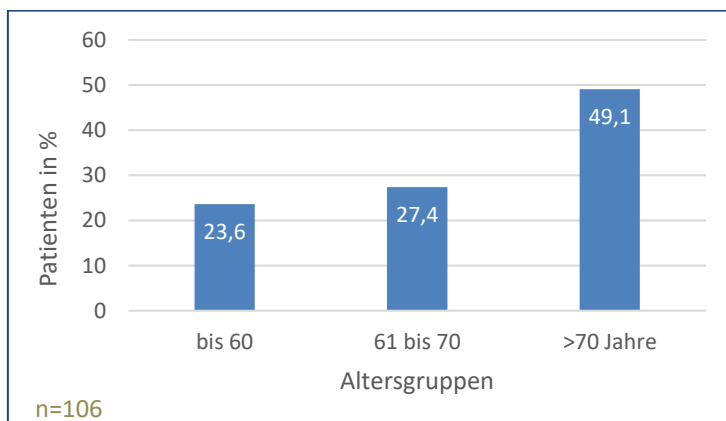


Abb. 20: Altersverteilung in drei Gruppen.

3.2 Anzahl und Lage der Foramina

In den meisten Fällen fand sich nur eine Eintrittspforte (externes Foramen) für die A. nutricia der Tibia. Dies war sowohl auf der rechten als auch auf der linken Seite mit einer Häufigkeit von 92,5 % zutreffend. Bei 6,6 % der Patienten lagen zwei Foramina vor (ebenfalls auf beiden Seiten). Signifikante Unterschiede zwischen Frauen und Männern konnten hierbei nicht festgestellt werden. Zwar fanden sich linksseitig bei den männlichen Patienten mehr als doppelt so viele Zweifach-Foramina als bei den Frauen, eine statistische Signifikanz wurde hierbei jedoch nicht erreicht (9,6 vs. 3,7 %; $p=0,270$) (Tab. 3 und Tab. 4).

Tab. 3: Anzahl der Foramina rechts (Vergleich Männer/Frauen).

Foramina (rechts)	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz p-Wert
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	
0	0	0,0	1	1,9	1	0,9	0,575*
1	49	94,2	49	90,7	98	92,5	
2	3	5,8	4	7,4	7	6,6	
3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Tab. 4: Anzahl der Foramina links (Vergleich Männer/Frauen).

Foramina (links)	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz p-Wert
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	
0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,270*
1	46	88,5	52	96,3	97	92,5	
2	5	9,6	2	3,7	7	6,6	
3	1	1,9	0	0,0	1	0,9	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Ebenso wie das Geschlecht hatte auch die Seitenlokalisierung keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Foramina. Die Häufigkeitsverteilung war bei der rechten und der linken Tibia fast identisch (Tab. 5).

Tab. 5: Anzahl der Foramina links (Vergleich rechts/links).

Foramina	Tibia rechts		Tibia links		Signifikanz p-Wert
	Anzahl	%	Anzahl	%	
0	1	0,9	0	0,0	0,951*
1	98	92,5	98	92,5	
2	7	6,6	7	6,6	
3	0	0,0	1	0,9	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; rechts vs. links.

Ogleich die Häufigkeit von einem und zwei Foramina sowohl rechts als auch links identisch war, ließ die weitere Analyse erkennen, dass die Übereinstimmungen nicht vollständig waren. So wiesen Patienten mit einem (n=1) Foramen auf der rechten Tibiaseite nur in 91,8% der Fälle auch nur ein (n=1) Foramen links auf. Die Zweifach-Foramina wiesen gar keine Übereinstimmung zwischen rechter und linker Seite auf. Bei allen Patienten, die auf der rechten Tibiaseite zwei Foramina aufwiesen, fand sich linksseitig nur ein (n=1) Foramen und umgekehrt (links n=2; rechts n=1) (Tab. 6).

Tab. 6: Übereinstimmungen der Foramina nach Seitenlokalisierung.

Foramina rechte Tibia	Foramina linke Tibia			
	0	1	2	3
0	0	1	0	0
1	0	90 von 98 (91,8 %)	7 von 98 (7,1 %)	1 von 98 (1,0 %)
2	0	7	0	0
3	0	0	0	0

In 98,1 % (rechts) bzw. 99,0 % (linke Tibiaseite) der Fälle waren die dominierenden externen Foramina von der Lage her posterior lokalisiert. Andere Lokalisationen spielten folglich nur

eine sehr untergeordnete Rolle. Relevante oder signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede fanden sich nicht (Tab. 7 und Tab. 8).

Tab. 7: Lokalisation der Foramina externa rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia rechts	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	p-Wert
Posterior	50	96,2	53	100	103	98,1	0,149*
Lateral	2	3,8	0	0,0	2	1,9	
Medial	0	0,0	0	0,0	0	0,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Tab. 8: Lokalisation der Foramina externa linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia links	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	p-Wert
Posterior	51	100	53	98,1	104	99,0	0,329*
Lateral	0	0,0	0	0,0	0	0,0	
Medial	0	0,0	1	1,9	1	1,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Da fast alle externen Foramina posterior lokalisiert waren, waren auch im Seitenvergleich keine relevanten Unterschiede vorhanden (Tab. 9). Dasselbe galt für die direkte Analyse der Überseitimmungen (Tab. 10).

Tab. 9: Lokalisation der Foramina externa (Vergleich rechts/links).

Foramina	Tibia rechts		Tibia links		Signifikanz p-Wert
	Anzahl	%	Anzahl	%	
Posterior	103	98,1	104	99,0	0,921*
Lateral	2	1,9	0	0,0	
Medial	0	0,0	1	1,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; rechts vs. links.

Tab. 10: Übereinstimmungen der Foramina externa nach Seitenlokalisierung.

Tibia rechts	Tibia links		
	Posterior	Lateral	Medial
Posterior	102 von 103 (99,0 %)	0	1 von 103 (1,0 %)
Lateral	1	0	0
Medial	0	0	0

Im Hinblick auf die internen Foramina waren die Ergebnisse fast mit jenen der oben beschriebenen externen Foramina identisch. Wiederum dominierte sowohl links- als auch rechtsseitig die posteriore Lokalisation mit 98,1 bis 100 % deutlich, wobei auch hier keine geschlechtsspezifischen Unterschiede vorlagen. Ferner fanden sich auch im Seitenvergleich (rechte vs. linke Tibiaseite) keine Unterschiede, weshalb auch im direkten Vergleich eine weitgehende Übereinstimmung vorlag (Tab. 11 bis Tab. 14).

Tab. 11: Lokalisation der Foramina interna rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia rechts	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	p-Wert
Posterior	51	98,1	53	100	104	99,0	0,310*
Lateral	1	1,9	0	0,0	1	1,0	
Medial	0	0,0	0	0,0	0	0,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Tab. 12: Lokalisation der Foramina interna linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia links	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	p-Wert
Posterior	51	100	53	98,1	104	99,0	0,329*
Lateral	0	0,0	0	0,0	0	0,0	
Medial	0	0,0	1	1,9	1	1,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; männlich vs. weiblich.

Tab. 13: Anzahl der Foramina interna (Vergleich rechts/links).

Foramina	Tibia rechts		Tibia links		Signifikanz
	Anzahl	%	Anzahl	%	p-Wert
Posterior	104	99,0	104	99,0	0,983*
Lateral	1	1,0	0	0,0	
Medial	0	0,0	1	1,0	

*p-Wert mittels Chi-Quadrat-Test; rechts vs. links.

Tab. 14: Übereinstimmungen der Foramina interna nach Seitenlokalisation.

Tibia rechts	Tibia links		
	Posterior	Lateral	Medial
Posterior	103 von 104 (99,9 %)	0 von 104	1 von 104 (1,0 %)
Lateral	0	0	0
Medial	0	0	0

3.3 Tibialänge und verschiedene anatomische Foramina-Parameter

In der Gesamtgruppe fand sich auf der rechten Seite eine Tibialänge von 369 ± 25 mm. Die Länge war bei den männlichen Patienten im Mittel etwa 10 mm größer als bei den Frauen (374 ± 23 vs. 363 ± 26 mm; $p=0,022$). Auch für fünf der acht untersuchten Foramina-Parameter konnten für die rechte Tibiaseite signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen festgestellt werden. Die größte Differenz lag hierbei für die durchschnittliche Distanz des inneren Foramens zum proximalen Tibiaende vor (Männer: 155 ± 15 vs. Frauen: 144 ± 15 mm; $p < 0,001$). Insgesamt waren die beiden Foramina (extern und intern) bei den Frauen etwas weiter proximal lokalisiert und die Länge des Kanals der A. nutricia war kürzer (Tab. 15).

Tab. 15: Verschiedene anatomische Parameter rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia rechts Parameter	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz p-Wert*
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	
Tibialänge (mm)	374,2	22,8	363,2	25,6	368,7	24,8	0,022
Distanz AF (mm)	118,3	14,3	113,2	10,9	115,7	13,0	0,042
Distanz IF (mm)	155,1	14,7	144,0	14,5	149,5	15,6	<0,001
Länge des NAC (mm)	36,8	11,7	30,2	13,2	33,4	12,8	0,008
NAC/Tibia-Relat. (%)	9,8	3,0	8,3	3,5	9,1	3,4	0,018
AF/Tibia-Relation (%)	31,6	3,4	31,2	2,6	31,4	3,0	0,484
IF/Tibia-Relation (%)	41,5	3,1	39,7	3,1	40,6	3,2	0,004
Anguläre Lok. AF (°)	25,8	20,4	19,9	12,6	22,8	17,1	0,079
Anguläre Lok. IF (°)	29,6	19,0	27,1	12,8	28,3	16,2	0,437

*männlich vs. weiblich mittels T-Test; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; AF= äußeres Foramen; IF = inneres Foramen; NAC = Nutritional Artery Canal; Lok = Lokalisation;

Distanzen gemessen von proximaler Tibia aus; Relationen = Parameter / Tibialänge x 100.

Für die linke Tibiaseite ergaben sich analog ähnliche Verhältnisse zwischen Männern und Frauen. Die Distanz von der proximalen Tibia bis zum inneren Foramen war bei den Männern etwa 15 mm länger (157 ± 17 vs. 143 ± 23 mm; $p=0,001$) (Tab. 16).

Tab. 16: Verschiedene anatomische Parameter linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).

Tibia links Parameter	Männlich		Weiblich		Gesamt		Signifikanz p-Wert*
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	
Tibialänge (mm)	374,2	23,3	363,5	25,0	368,8	24,7	0,025
Distanz AF (mm)	121,5	22,0	112,7	11,4	117,0	368,8	0,012
Distanz IF (mm)	157,0	17,3	142,8	23,3	149,7	21,7	0,001
Länge des NAC (mm)	35,5	12,5	30,1	20,1	32,7	17,0	0,105
NAC/Tibia-Relat. (%)	9,5	3,4	8,2	5,7	8,9	4,7	0,154
AF/Tibia-Relation (%)	32,5	5,3	31,0	2,6	31,7	4,2	0,082
IF/Tibia-Relation (%)	42,0	4,0	39,2	5,7	40,6	5,1	0,005
Anguläre Lok. AF (°)	22,8	16,1	24,5	20,7	23,7	18,5	0,637
Anguläre Lok. IF (°)	26,7	13,9	30,7	22,2	28,7	18,4	0,273

*männlich vs. weiblich mittels T-Test; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; AF= äußeres Foramen; IF = inneres Foramen; NAC = Nutritional Artery Canal; Lok = Lokalisation;
Distanzen gemessen von proximaler Tibia aus; Relationen = Parameter / Tibialänge x 100.

Anders als das Geschlecht hatte die Seitenlokalisierung (rechte vs. linke Tibia) keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Parameter. Die Differenzen waren minimal und bewegten sich im Rahmen von durchschnittlich 1 bis 2 mm (Tab. 17).

Tab. 17: Verschiedene anatomische Parameter linke Tibia (Vergleich rechts/links).

Parameter	Tibia rechts		Tibia links		Signifikanz p-Wert*
	MW	SD	MW	SD	
Tibialänge (mm)	368,7	24,8	368,8	24,7	0,592
Distanz AF (mm)	115,7	13,0	117,0	368,8	0,317
Distanz IF (mm)	149,5	15,6	149,7	21,7	0,705
Länge des NAC (mm)	33,4	12,8	32,7	17,0	0,675
NAC/Tibia-Relat. (%)	9,1	3,4	8,9	4,7	0,667
AF/Tibia-Relation (%)	31,4	3,0	31,7	4,2	0,394
IF/Tibia-Relation (%)	40,6	3,2	40,6	5,1	0,855
Anguläre Lok. AF (°)	22,8	17,1	23,7	18,5	0,642
Anguläre Lok. IF (°)	28,3	16,2	28,7	18,4	0,814

*männlich vs. weiblich mittels T-Test; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; AF= äußeres Foramen; IF = inneres Foramen; NAC = Nutritional Artery Canal; Lok = Lokalisation; Distanzen gemessen von proximaler Tibia aus; Relationen = Parameter / Tibialänge x 100.

Zur Veranschaulichung sind in der nachfolgenden Abbildung die wichtigsten Mess-Strecken bei Männern und Frauen für die jeweils rechte Tibiaseite nochmals grafisch dargestellt (Abb. 21 und Abb. 22).

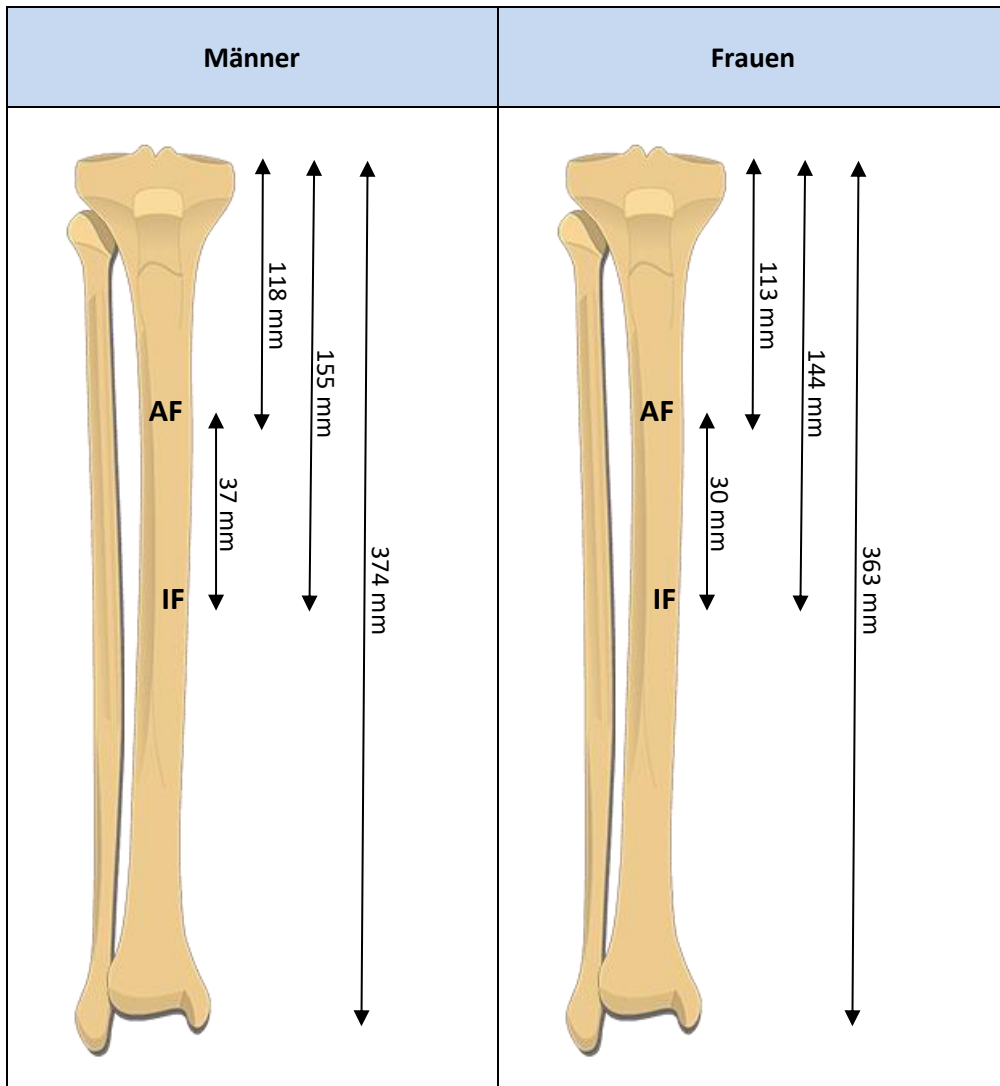


Abb. 21: Grafische Darstellung der wichtigsten Mess-Strecken bei Männern und Frauen (Tibia rechts).

AF = äußeres Foramen; IF = inneres Formamen.

Anhand der folgenden Grafik wird deutlich, dass die äußeren Foramina sowohl bei Frauen als auch Männern in 90 % der Fälle mindestens 100 mm caudal des proximalen Tibiaplateau lagen, wobei die Foramina sich über einen Bereich von etwa 30 mm verteilten. Ferner wird erkennbar, dass sich die möglichen Lagen der externen und internen Foramina zwar nicht überlappten, dass diese jedoch unmittelbar aneinander angrenzten (Abb. 22).

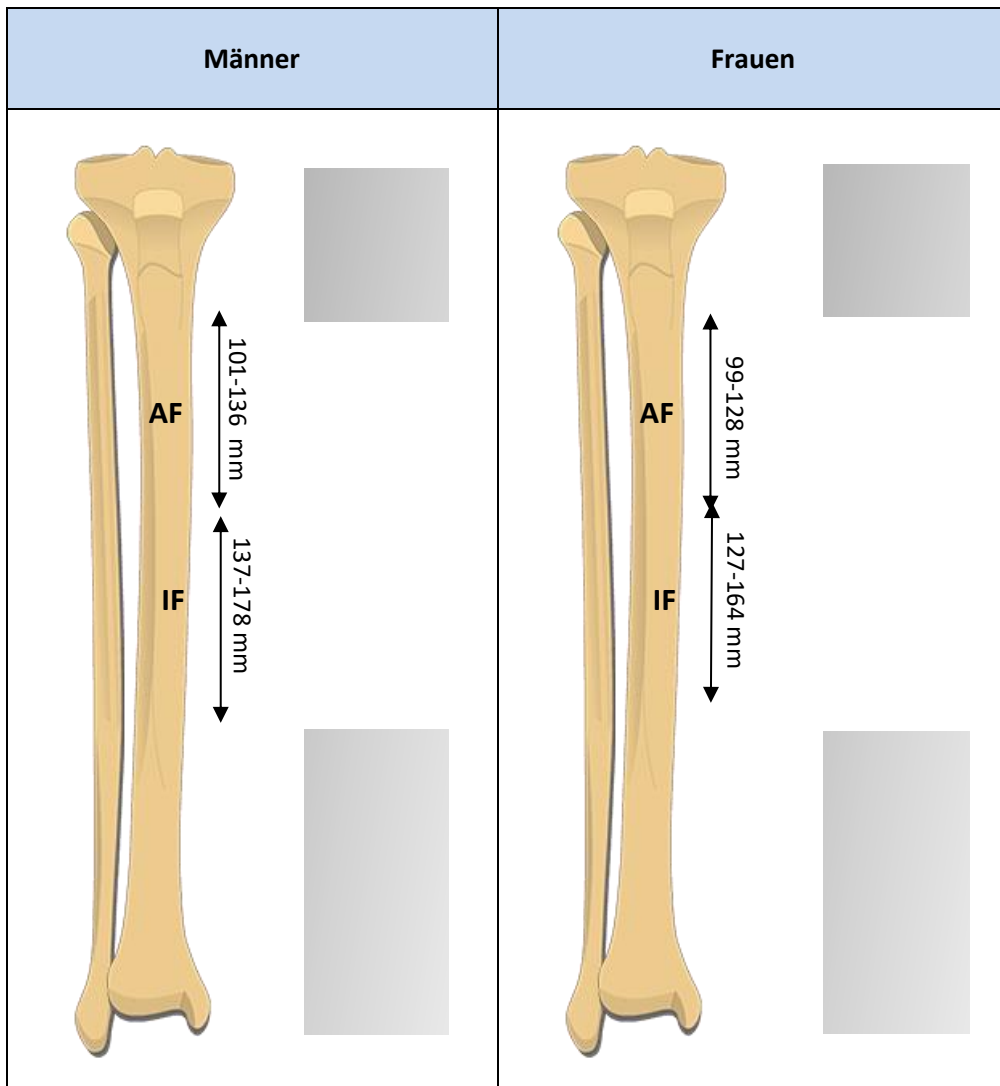


Abb. 22: Grafische Darstellung der AF- und IF-Distanz bei Männern und Frauen (Tibia rechts; Angabe der 10. und 90. Perzentile).

AF = äußeres Foramen; IF = inneres Foramen; grau schattiert = sicherer Bereich.

In der folgenden Tabelle sind die Korrelationen zwischen der Tibialänge und den anatomischen Verhältnissen der beiden Foramina (äußeres und inneres Foramen) sowie der Länge des nutritiven Kanals dargestellt. Eine starke Korrelation wies bei den Männern und Frauen die Tibialänge mit der Distanz zum inneren Foramen auf ($r=0,62$ bzw. $0,64$). Etwas weniger ausgeprägt, aber immer noch stark und statistisch hochsignifikant, war bei beiden Geschlechtern die Korrelation der Tibialänge mit der Distanz zum äußeren Foramen ($r=0,48$ bzw. $0,56$). Keine statistisch signifikante Korrelation konnte für das Verhältnis zwischen Tibialänge und Länge des nutritiven Kanals aufgezeigt werden. Allenfalls bei den Frauen war hier eine schwache Korrelation zu beobachten, die jedoch nicht statistisch signifikant war ($r=0,26$; $p=0,066$) (Tab. 18).

Tab. 18: Korrelation zwischen der Tibialänge (re.) und anatomischen Parametern.

Tibia rechts Parameter	Männer		Frauen	
	Korrelation (r)	p-Wert	Korrelation (r)	p-Wert
Distanz AF	0,48	<0,001	0,56	<0,001
Distanz IF	0,62	<0,001	0,64	<0,001
Länge NAC	0,18	0,203	0,26	0,066

r = Korrelation nach Pearson; Distanz AF = proximale Tibia bis äußeres Foramen; Distanz IF = proximale Tibia bis inneres Foramen; NAC = Nutritional Artery Canal.

Nachfolgend sind die Korrelationen für die Gesamtgruppe (Männer + Frauen) zur besseren Veranschaulichung auch grafisch in Form von Säulendiagrammen dargestellt. Wiederum ist nur die Analyse der rechten Körperseite berücksichtigt. Es wird für die Beziehung zwischen der Tibialänge und den Foramina-Distanzen (äußeres und inneres) gut erkennbar, dass mit zunehmender Länge des Knochens die Distanz zu den Foramina zunimmt. Der Verlauf entspricht allerdings nicht einer idealen Linie, weshalb der Korrelations-Koeffizient auch deutlich vom Maximum ($r=1$) abweicht. Dennoch sind die Korrelationen mit $0,5$ bis $0,6$ stark und statistisch auch signifikant (Abb. 23 und Abb. 24).

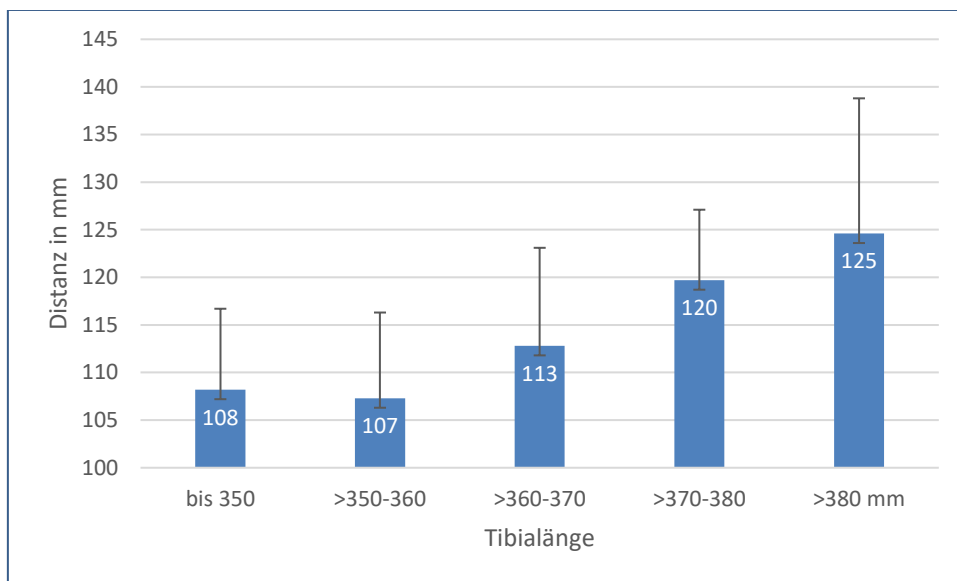


Abb. 23: Abhängigkeit der Distanz des **äußeren Foramens** von der Tibialänge.

Gesamtgruppe (Männer + Frauen): $r=0,53$ ($p<0,001$) nach Spearman.

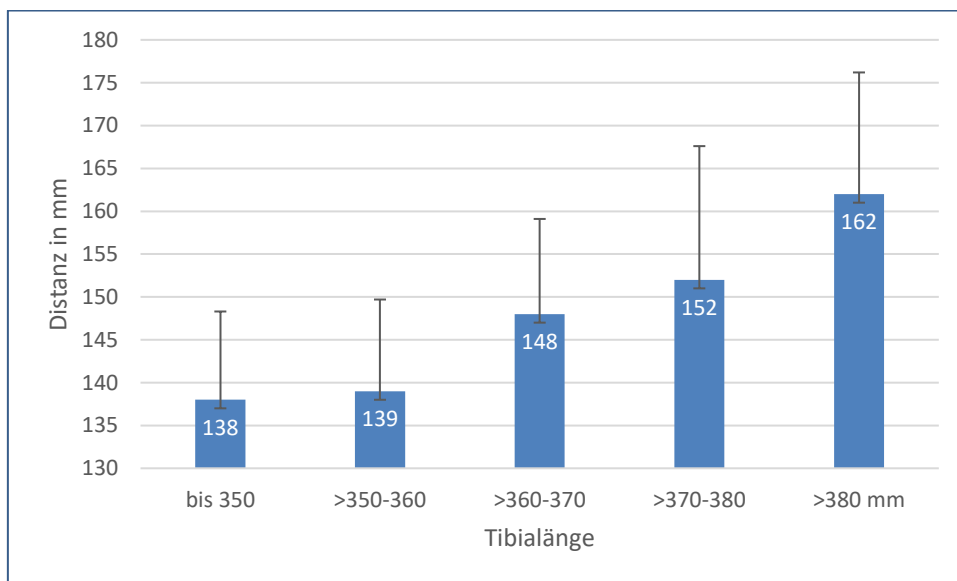


Abb. 24: Abhängigkeit der Distanz des **inneren Foramens** von der Tibialänge.

Gesamtgruppe (Männer + Frauen): $r=0,65$ ($p<0,001$) nach Spearman.

Für den Zusammenhang zwischen Tibialänge und Länge des Kanals der *A. nutricia* konnte ebenfalls eine signifikante Korrelation aufgezeigt werden. Allerdings war sie deutlich schwächer ausgeprägt als für die beiden obigen Parameter ($r=0,26$; $p=0,007$) (Abb. 25).

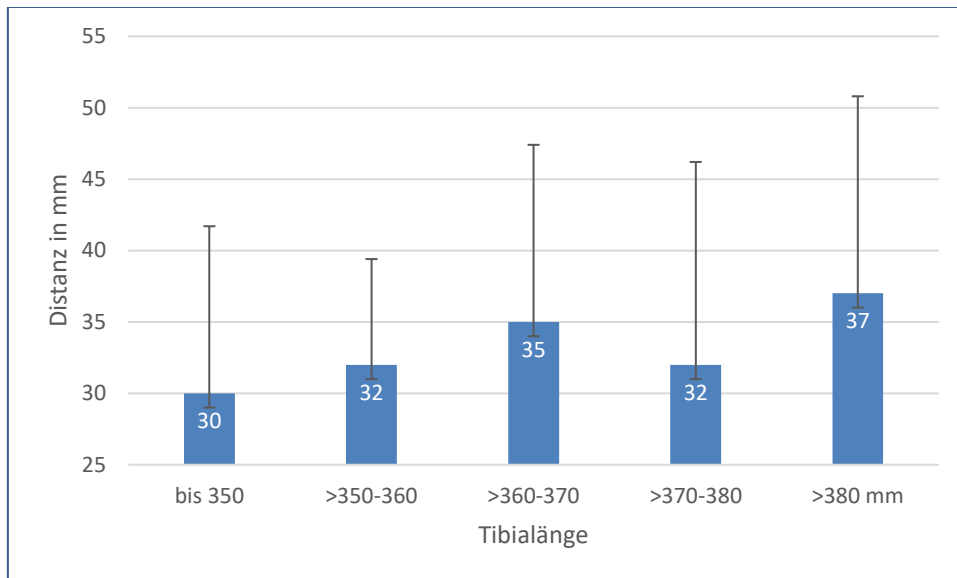


Abb. 25: Abhängigkeit der **NAC-Länge** von der Tibiallänge.

Gesamtgruppe (Männer + Frauen): $r=0,26$ ($p<0,007$) nach Spearman; NAC = Nutritional Artery Canal.

4 Diskussion

4.1 Hintergrund

Im Zuge von Frakturen und von deren Behandlungen kann als häufige Komplikation eine verzögerte Knochenheilung auftreten (ca. 5 bis 10 % aller Frakturen). Besonders problematisch ist es, wenn die Frakturen gar nicht mehr fusionieren (non-union) und es somit zu einer Pseudarthrose kommt. Dies ist bei ca. 1 bis 5 % der Fall, wobei die Inzidenz stark vom betroffenen Knochen, dem Ausmaß der Verletzung und individuellen Risikofaktoren abhängt. Bei offenen Tibiafrakturen wurde sogar über Inzidenzen von bis zu 50 % berichtet (Zimmermann et al. 2009; Steinhausen et al. 2013).

Die Therapie von stark verzögerten Knochenheilungen und Pseudarthrosen ist meist langwierig und stellt nicht nur ein medizinisches, sondern auch ein großes soziökonomisches Problem dar. Die Lebensqualität der Patienten ist meist erheblich eingeschränkt (Bishop et al. 2012; Steinhausen et al. 2013).

Die Ursachen von Knochenheilungsstörungen sind vielfältig. Neben patientenabhängigen Risikofaktoren wie Alter, Diabetes oder Nikotinkonsum spielt auch die gestörte Durchblutung des Knochens als Folge der Fraktur oder der Frakturbehandlung eine maßgebliche Rolle. Hierbei kommt insbesondere der A. nutricia eine wichtige Bedeutung zu (Rhineland 1974; Peng et al. 2013; Steinhausen et al. 2013). So konnte gezeigt werden, dass es durch die intramedulläre Nagelung (Marknagel), aber auch nach Behandlung mit Platten und Schrauben, zu einer signifikanten Störung der Integrität der A. nutricia kommen kann (Paar et al. 2000; Peng et al. 2013). Eine besondere Schwachstelle stellt dabei der knöcherne Kanal der A. nutricia dar, da in dieser Region anatomisch bedingt kein Ausweichen des Gefäßes möglich ist.

Vor diesem Hintergrund ist es von großer klinischer Relevanz, über möglichst präzise Informationen zu Lage und Verlauf des Kanals der A. nutricia zu verfügen. Von besonderem Interesse ist dies in Bezug auf die Tibia (TNAC; Tibial Nutrient Artery Canal), da es dort nach

diaphysären Frakturen, häufiger als bei anderen Röhrenknochen, zu Wachstumsstörungen und Pseudarthrosen kommt.

Es liegt bereits eine Reihe an Studien vor, deren Ziel es war, die anatomischen Verhältnisse der *A. nutricia* näher zu beschreiben. Meist handelte es sich hierbei jedoch um Untersuchungen an anatomischem Präparaten, wobei Angaben zu Alter und Geschlecht oft unbekannt waren (Mysorekar 1967; Forriol Campos et al. 1987; Schiessel und Zweymüller 2004; Kizilkanat et al. 2007; Murlimanju et al. 2011; Gupta und Gupta 2014; Tejaswi et al. 2016). Außerdem können Knochen von Leichen Abrasionen aufweisen, die durch Lagerung und Transport oder aber durch die Präparation selbst bedingt sind. Anatomische Strukturen können deshalb maskiert sein, was vermutlich vor allem für die Fälle von multiplen Foramina zutreffen dürfte. Das größte Defizit der bisherigen Studien liegt allerdings darin, dass methodisch bedingt fast ausnahmslos nur auf die Eintrittspforte (externes Foramen) der *A. nutricia* fokussiert wurde. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen der eigenen Studie eine Untersuchung an lebenden Patienten vorgenommen, wobei die Befunde der CT-Aufnahmen die anatomische Basis bildeten. Fehlerquellen, wie sie bei der Beurteilung durch Vermessung mit bloßem Auge vorkommen können, sollten auf diese Weise ausgeschlossen werden. Außerdem ließ sich anhand der sagittalen Schnittbilder der TNAC gut darstellen, der am nativen anatomischen Präparat verborgen bleibt. Neben den gängigen Messgrößen wurde auch die anguläre Position der Ein- und Austrittspforten bestimmt, was bislang noch in keiner früheren Studie untersucht worden war. Die Ein- und Austrittspforten konnten in den transversalen Schichtebenen sehr gut identifiziert werden. Da alle Patientendaten vorlagen, konnte darüber hinaus auch der Einfluss von Geschlecht und Seitenlokalisation systematisch überprüft werden.

4.2 Anzahl der tibialen Foramina

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten die Daten von 106 Patienten ausgewertet werden. Das mittlere Alter lag bei 70,1 Jahren, wobei keine geschlechtsspezifischen Unterschiede vorhanden waren. Im Übrigen waren Frauen und Männer nahezu gleichhäufig vertreten (n=54 bzw. 52), so dass auch in dieser Hinsicht keine Verzerrung der Daten vorlag.

Wie aufgrund früherer Studienergebnisse zu erwarten war, wies der überwiegende Anteil der Patienten nur eine Eintritts- bzw. Austrittspforte auf (92,5 %). Eine Seitenabhängigkeit lag hierbei nicht vor. Auch hinsichtlich des Geschlechts konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, wenngleich auf der linken Seite der Anteil mit nur einem Foramen bei den Frauen höher war (96,3 vs. 88,5 %). Hingegen war linksseitig der Anteil mit zwei Foramina bei den Männern größer (9,6 vs. 3,7 %). Keiner der Unterschiede erreichte jedoch eine statistische Signifikanz. Die Differenzen sind folglich im Rahmen der normalen Streubreite zu interpretieren. Erwähnenswert ist an dieser Stelle noch, dass nur bei einem Patienten und dies auch nur auf einer Seite (rechts) kein Foramen identifiziert werden konnte. Auch drei Foramina wurden nur in einem Fall (linke Tibia) beobachtet.

Das Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen, wie sie bereits in sehr frühen Studien gemacht wurden. Auch hier fand sich in mehr als 90 % der Fälle nur eine Eintrittspforte für die tibiale A. nutricia (Mysorekar 1967; Trueta 1974; Forriol Campos et al. 1987; Sendemir und Cimen 1991). Ganz ähnliche Ergebnisse fanden sich ferner in vielen später durchgeführten Studien (Kizilkanat et al. 2007; Pereira et al. 2011; Ankolekar et al. 2013; Mazenganya und Fasemore 2015; Agrawal et al. 2016; Ambekar und Sukre 2016; Mohan et al. 2017; Parmar et al. 2019).

Allerdings gibt es auch Untersuchungen, bei denen sich stärker abweichende Ergebnisse ergeben hatten. So fanden sich in einer aktuelleren Studie aus Indien, in der 100 tibiale Knochenpräparate untersucht wurden, singuläre Foramina in lediglich 80 Fällen (80 %) und

der Anteil mit zwei Foramina war mit 18 % etwa doppelt so hoch wie in der eigenen Untersuchung (Aghera und Ahmed 2020). Mit einem Anteil von deutlich mehr als 10 % wurden tibiale Doppelforamina auch in den Studien von Udaya et al. (2017) sowie Roul und Goyal (2015) beobachtet. Bei Udaya et al. war dies bei 13,5 % (rechte Seite) und 10,4 % (links) der untersuchten Präparate der Fall, bei Roul et al. lag der Anteil mit 16,2 % sogar noch höher. Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass insbesondere bei Roul et al. die Fallzahl mit 37 Tibiae sehr gering war. Davon abgesehen handelte es sich in beiden Fällen ebenfalls um Studien aus Indien, so dass sich die Frage stellt, inwiefern ethnische Faktoren für die hohe Rate der Doppelforamina verantwortlich sein könnten. Gegen eine solche Annahme sprechen allerdings andere Studien, die ebenfalls in Indien durchgeführt wurden. So lag der Anteil der Tibiae mit zwei oder mehr Foramina zum Beispiel in der Untersuchung von Ambekar und Sukre (2016) bei lediglich 5,7 %, wobei insgesamt fast 1.000 Knochen als Basis dienten. In einer weiteren indischen Studie fanden sich bei nur drei von 150 Tibiae (2 %) Doppelforamina (Mohan et al. 2017). Bei Parmar et al. (2019) wiesen sogar alle 60 Tibiae lediglich ein singuläres Foramen auf. Vor diesem Hintergrund ist es eher unwahrscheinlich, dass die ethnische Herkunft einen Einfluss auf die Zahl der tibialen Eintrittspforten der *A. nutricia* hat. Untermuert wird dies im Übrigen durch Untersuchungen aus anderen Regionen (Südafrika und Australien), bei denen deutlich mehr als 90 % der Präparate nur ein Foramen aufwiesen (Kizilkanat et al. 2007; Mazenganya und Fasemore 2015). In der Studie von Mazenganya et al. wiesen 99,4 % der schwarzen und 98,3 % der weißen Bevölkerung ein Einzelforamen auf. Wesentliche geschlechts- oder seitenbezogene Unterschiede konnten hier im Übrigen ebenfalls nicht festgestellt werden, womit auch in dieser Hinsicht die eigenen Ergebnisse bestätigt worden sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei den meisten Patienten (> 90%) an der Tibia nur eine Eintrittspforte für die *A. nutricia* vorhanden ist; in den übrigen Fällen sind es meist zwei Foramina. Mehr als zwei Foramina kommen nur sehr vereinzelt vor. Davon abgesehen stellt das Fehlen eines Foramens eine extreme Rarität dar. Wie bereits ausgeführt trat dieses Phänomen in der eigenen Untersuchung nur bei einem Patienten auf (0,9 %). In einer Studie aus Indien wurde diesbezüglich eine ähnliche Rate ermittelt (n=3 von 312; 0,96 %) (Gupta und Gupta 2014). Die Autoren vermuteten hierbei, dass es sich um

die Erstbeschreibung dieser seltenen Anomalie handelte, was allerdings nicht ganz korrekt war. Vielmehr war das Fehlen eines tibialen Foramens bereits wenige Jahre zuvor in einer ebenfalls in Indien durchgeführten Studie beobachtet worden. Es fand sich dort bei einem der 69 untersuchten Tibiae (1,4 %) (Murlimanju et al. 2011).

4.3 Lage der tibialen Foramina (transversal)

Hinsichtlich der anatomischen Lage in der transversalen Ebene wurden sowohl die externen (EF) als auch die internen Foramina (IF) untersucht. Mit den EF sind hierbei die Eingangspforten der A. nutricia gemeint, mit den IF dementsprechend die Ausgangspforten (Übertritt der A. nutricia in den Markraum). Es zeigte sich, dass nahezu alle externen Foramina posterior lokalisiert waren (98,1 %) (bei zwei oder mehr Foramina bezieht sich dies jeweils auf das dominante Foramen). Vor dem Hintergrund, dass laterale und mediale Lagen der EF nur sehr vereinzelt vorkamen (n=2 lateral; n=1 medial) waren relevante geschlechts- oder seitenbezogene Unterschiede nicht nachzuweisen. Dies galt im Übrigen auch für die internen Foramina, die ebenfalls bei fast allen Patienten eine posteriore Lage aufwiesen.

In der Studie von Aghera und Ahmed (2020) fanden sich unter den 100 untersuchten Tibiae von Patienten mit unbekanntem Geschlecht und Alter 96 mit posteriorer Lage des EF. In den übrigen vier Fällen befand sich der Übertritt der A. nutricia in die Kortikalis an der lateralen Oberfläche der Tibia. Ähnliches wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt. So wiesen bei Parmar et al. (2019) alle externen Foramina der 60 Tibiae (je n=30 re. und li.) eine posteriore Lage auf. Weitere Untersuchungen erbrachten vergleichbare Ergebnisse (Malukar und Joshi 2011; Ankolekar et al. 2013; Mohan et al. 2017; Vinay und Mangale Gowri 2017). Allerdings haben sich auch Abweichungen von diesen Beobachtungen gezeigt. So waren in der Untersuchung von Mazenganya und Fasemore (2015) die Foramina bei der weißen südafrikanischen Bevölkerung nur in 77,8 % der Fälle posterior lokalisiert; bei der schwarzen Bevölkerung war die Rate mit 75,6 % sogar noch etwas geringer. Aller-

dings wurde in jener Studie eine andere Einteilung als in der eigenen Untersuchung vorgenommen (posterior, posterolateral und lateral vs. posterior, lateral und medial in der eigenen Studie). Sofern man bei Mazengeny und Fasemore die posterolateralen Lagen (20,6 % bei Weißen und 22,8 % bei Schwarzen) zu den posterioren hinzurechnet, kommt man auf eine Rate von 98,3 % für beide Ethnien. Diese Rate wäre dann wieder in Übereinstimmung mit dem eigenen Ergebnis.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich in fast allen Fällen (oder zumindest deutlich mehr als 90 %) die Eintrittspforten der tibialen A. nutricia in der posterioren Lage befinden, wobei keine geschlechts- oder seitenspezifischen Unterschiede festzustellen waren. Ein nahezu identischer Befund hatte sich auch für das innere Foramen ergeben (Übergang der A. nutricia in den Markraum). Ein Vergleich mit anderen Studien war diesbezüglich allerdings nicht möglich, da dieser Aspekt bislang noch keine Berücksichtigung gefunden hatte.

4.4 Anguläre Lage der tibialen Foramina

Da die Einteilung in drei Regionen (posterior, medial und lateral) nur ein relativ grobes Raster darstellt und ein Vergleich mit anderen Studien deshalb nur bedingt zulässig ist (wie die Studie von Mazengeny und Fasemore zeigte), wurde in der eigenen Untersuchung erstmalig der Versuch unternommen, die Lage in der transversalen Ebene präzise zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde die anguläre Lokalisation ermittelt, wobei als fixer Referenzpunkt das Zentrum der Fibula herangezogen worden ist (vgl. Kap. 2.6 Anatomische Messgrößen, S. 38 ff. in Methodik).

In Bezug auf die rechte Tibia fiel auf, dass der Winkel des externen Foramens um durchschnittlich etwa fünf Grad geringer war als der des inneren Foramens ($22,8 \pm 17,1$ vs. $28,3 \pm 16,2^\circ$; $p < 0,001$). Besonders groß war diese Differenz bei den Frauen, der mittlere Unterschied lag hier bei $7,2^\circ$; bei den Männern war die Differenz nur etwa halb so groß ($3,8^\circ$). Die Unterschiede zwischen Frauen und Männern selbst blieben jedoch ohne statistische

Signifikanz. Eine etwas größere Differenz ergab sich hier jedoch in Bezug auf das externe Foramen, wobei zumindest tendenziell eine statistische Signifikanz vorlag (Frauen vs. Männer: $19,9 \pm 12,6$ vs. $25,8 \pm 20,4^\circ$; $p=0,079$). Das innere Foramen liegt folglich bei Männern und Frauen etwa fünf Grad weiter medial als das Externe. Der Winkel des externen Foramens ist bei Männern durchschnittlich knapp sechs Grad größer als bei Frauen und liegt somit ebenfalls etwas weiter medial.

In Bezug auf die linke Tibia war der Winkel des externen Foramens ebenfalls um durchschnittlich fünf Grad geringer als der des internen Foramens ($23,7 \pm 18,5$ vs. $28,7 \pm 18,4^\circ$; $p<0,001$). Signifikante Unterschiede zwischen Frauen und Männern lagen hierbei aber nicht vor, im Gegensatz zum externen Foramen, bei dem zumindest tendenziell eine statistisch signifikante Differenz festgestellt werden konnte.

Der geschlechtsunabhängige Vergleich (Männer und Frauen zusammen) machte nochmals deutlich, dass sowohl auf der rechten als auf der linken Tibiaseite das interne Foramen etwa fünf Grad weiter posterior lokalisiert war als das externe Foramen (23 bis 24° vs. ca. 28 bis 29°). Die anguläre Position des externen Foramens war bei Frauen und Männern ähnlich. Dies galt auch für das interne Foramen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das interne Foramen etwa fünf Grad weiter posterior lokalisiert ist als das Externe. Bei Frauen ist die Differenz zwischen den beiden Foramina etwa doppelt so groß wie bei den Männern. Die Seitenlokalisierung (re. vs. li. Tibia) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Winkel bzw. die transversale Lage der Foramina.

Anhand weiterer Studien wäre zu prüfen, inwieweit die eigenen Ergebnisse validiert werden können. Größere Abweichungen sind allerdings nicht zu erwarten, da das eigene Patientengut bereits eine hinreichend große Fallzahl umfasste, um sichere Ergebnisse zu erzielen. Davon abgesehen ist die klinische Relevanz einer Differenz von etwa fünf Winkelgraden nicht sehr groß. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass die Ergebnisse bei den einzelnen Patienten eine große Streubreite aufwiesen. So wies das externe Foramen eine

Spanne auf, die von etwa 0 bis 85° reichte und somit fast ein ganzes Viertel des Knochenumfangs ausmachte. Folgt man dieser Betrachtung, so dürfte eine Einteilung in die drei Regionen (posterior, medial und lateral) für die klinischen Belange ausreichend sein. Sofern der posteriore Bereich bei mechanischen Eingriffen an der Tibia ausgespart wird, ist mit hinreichender Sicherheit nicht mit Läsionen des Kanals der A. nutricia zu rechnen.

4.5 Lage der tibialen Foramina (vertikal)

Neben der transversalen Lage werden die Foramina durch die vertikale Lage charakterisiert. Diese wird durch die Distanz zwischen dem proximalen Ende der Tibia und dem jeweiligen Foramen (externes oder internes) beschrieben.

Die durchschnittliche Distanz des externen Foramens (EF) zum oberen Ende der Tibia lag bei $115,7 \pm 13,0$ mm (re.) bzw. $117,0 \pm 17,9$ mm (li.). Die geringe mittlere Differenz von 1,3 mm zwischen der rechten und der linken Tibiaseite blieb ohne statistische Signifikanz. Signifikant war allerdings der Unterschied zwischen Frauen und Männern auf der rechten ($113,2 \pm 10,9$ vs. $118,3 \pm 14,3$ mm; $p=0,042$) sowie auf der linken Seite ($112,7 \pm 11,4$ vs. $121,5 \pm 22,0$ mm; $p=0,012$). Die Strecke war folglich bei den Frauen um 4,3 % (re.) bzw. 7,2 % (li.) kürzer. Das Ergebnis ist insbesondere deshalb interessant, als dass die Länge der Tibia bei den Frauen nur um 2,9 % geringer als bei den Männern war (re. und li.). Ginge man davon aus, dass eine strenge Korrelation zwischen der Knochenlänge und der EF-Distanz besteht, so hätte man erwartet, dass diese Strecke bei den Frauen um etwa 3 % kürzer ist als bei den Männern, und nicht 4,3 bzw. 7,2 %.

Für das weiter entfernte interne Foramen (IF) wurde eine durchschnittliche Strecke von $149,5 \pm 15,6$ mm (re.) bzw. $149,7 \pm 21,7$ mm (li.) ermittelt. Erwartungsgemäß war die Distanz bei den Frauen wiederum kleiner als bei den Männern ($144,0 \pm 14,5$ mm vs. $155,1 \pm 14,7$ mm auf der rechten Seite; $p<0,001$). Dies entsprach einer mittleren Differenz von 7,2 %. Linksseitig war der Befund qualitativ ähnlich, wobei die Differenz mit 9,0 % etwas

größer war. Erneut wird deutlich, dass die Differenzen wesentlich größer waren, als es aufgrund der unterschiedlichen Tibialängen-Differenz bei Frauen und Männern (2,9 %) zu erwarten gewesen war. Demgemäß war auch der prozentuale Anteil der IF-Distanz an der Tibialänge bei Männer signifikant größer als bei den Frauen (rechts: $41,5 \pm 3,1$ vs. $39,7 \pm 3,1$ %; $p=0,004$; links: $42,0 \pm 4,0$ vs. $39,2 \pm 5,7$ %; $p=0,005$). In Bezug auf das externe Foramen fand sich für die Relation zur Tibia allerdings kein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied. Die EF/Tibia-Relation war bei Frauen nur geringfügig kleiner (0,4 %-Punkte rechts bzw. 1,5 %-Punkte links. Für die linke Seite der Tibia war die Differenz jedoch zumindest tendenziell statistisch signifikant ($31,0 \pm 2,6$ vs. $32,5 \pm 5,3$ %; $p=0,082$).

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die externen und internen Foramina im Durchschnitt etwa 115 bzw. 150 mm vom oberen Rand der Tibia entfernt sind. Bei Frauen sind die Strecken kleiner als aufgrund der kürzeren Tibialänge zu erwarten gewesen wäre. Die aussagekräftigeren relativen Distanzen (Verhältnis der Strecke zur Tibialänge) betragen für das externe Foramen (EF) im Mittel 31,6 % (Männer) bzw. 31,2 % (Frauen) und für das interne Foramen (IF) 41,5 % (Männer) bzw. 39,7 % (Frauen) (jeweils rechte Tibia). Linksseitig waren die Befunde qualitativ ähnlich. Sofern man die geschlechtsspezifischen Unterschiede unberücksichtigt lässt, kann vereinfacht festgestellt werden, dass das EF etwa 31 bis 32 % vom proximalen Tibiaende entfernt ist, für das IF ergibt sich eine zusätzliche Distanz von ca. 10 %-Punkten bzw. eine relative Entfernung von 40 bis 42 %, gemessen an der Tibialänge. In der Literatur wurden diese relativen Strecken meist als Foraminal-Index (FI) bezeichnet, weshalb im Folgenden an diesem Terminus festgehalten wird.

Die vertikale Position von Foramina wurde auch bereits in zahlreichen früheren Studien untersucht. Es handelte sich hierbei fast ausnahmslos um Messungen am anatomischen Präparat, weshalb sich die Ergebnisse in der Regel nur auf das externe Foramen beschränken (das interne Foramen ist am nativen Knochen nicht sichtbar). Sofern im Folgenden nicht explizit das interne Foramen beschrieben wird, beziehen sich deshalb alle Aussagen auf das externe Foramen bzw. die Eintrittspforte der *A. nutricia tibiae*. Ferner werden im

Folgenden die eigenen Ergebnisse wiederholt, wo es dem besseren Verständnis dient. Die entsprechenden Angaben sind dabei zur Abgrenzung in eckige Klammern gefasst.

Die (möglicherweise) erste systematische Messung dieser Art an der humanen Tibia wurde in einer Studie aus Spanien in den 1980er Jahren durchgeführt. Für den FI wurde hier ein Wert von 35,4 % ermittelt, der somit um fast vier Prozentpunkte höher war als bei den eigenen Patienten (Forriol Campos et al. 1987). Der Unterschied dürfte in diesem Fall auf die eher geringe Zahl der untersuchten Präparate zurückzuführen sein (n=30); in solchen Fällen können bereits ein bis zwei Ausreißer mit hohem FI das Ergebnis nach oben hin verfälschen. Bemerkenswert an der Studie von Forriol et al. war, dass hier auch weitere lange Röhrenknochen vermessen worden waren. Hierbei zeigte sich an allen anderen Knochen ein größerer FI, was bedeutet, dass insbesondere an der Tibia die Eintrittspforte der A. nutricia nach proximal verlagert ist. Dies impliziert zumindest theoretisch, dass der distale Bereich schlechter durchblutet sein könnte. Diese Vermutung wird im Übrigen auch dadurch gestützt, dass die A. nutricia tibiae bei Übertritt ins Knochenmark nach distal lediglich einen Ast abgibt, nach proximal hingegen zwei bis drei (Rhineland 1974; Matiyahu und Marmor 2015; Anetai et al. 2021).

In einer Studie aus Deutschland mit 200 Tibia-Präparaten ergab sich für das Foramen eine Distanz von 117 mm [eigene Studie: 116 re. und 117 mm li.]. Die durchschnittliche Länge der Tibia wurde mit 349 mm angegeben [369 mm], so dass sich ein FI von 33,5 % ergeben hatte (Kirschner et al. 1998). Der Wert war hier um etwa zwei Prozentpunkte höher als in der eigenen Untersuchung.

In einer Studie aus der Türkei waren 134 tibiale Präparate vermessen worden. Das besondere war, dass die Knochen aus Ausgrabungen stammten und teilweise mehrere hundert Jahre alt waren (einige aus der Zeit um das 10. Jahrhundert). Für die 128 posterior gelegenen Foramina hatte sich hierbei FI von 32,3 % ergeben, wobei die Spannweite mit 24,4 bis 56,3 % sehr groß war. Bemerkenswert ist, dass die wenigen lateral gelegenen Foramina mit 38,2 % einen deutlich höheren FI aufwiesen (Sendemir und Cimen 1991). Davon abgesehen lag der FI im Bereich dessen, was in der eigenen Untersuchung festgestellt wurde. Aller-

dings war die durchschnittliche Tibialänge mit 359 mm kleiner als bei den eigenen Patienten und sogar kleiner als bei den weiblichen Patienten des eigenen Kollektivs [363 mm] [Gesamtgruppe: 369 mm]. Wiederum wurde aus der türkischen Studie deutlich, dass der FI für den Femur mit etwa 50 % wesentlich größer war, womit nochmals die potenzielle Vulnerabilität der distalen Tibia untermauert wird. Die mutmaßliche Minderversorgung wird allerdings insofern etwas relativiert, als dass die tibiale A. nutricia nach dem Übertritt in den Markraum zunächst noch bis etwa zur Mitte, also bis zu einem FI von 50 %, weiterverläuft, bevor sie sich nach proximal und distal hin aufspaltet (Menck et al. 1992b). Nur sehr vereinzelt weist die Richtung der A. nutricia direkt nach dem Eintritt in den Markraum nach oben (Mazengenya und Fasemore 2015). Unabhängig davon gibt es jedoch Hinweise darauf, dass Frakturen im unteren Tibiabereich eher zur verzögerten Knochenheilung oder zur Pseudarthrose neigen als weiter proximal gelegene Verletzungen (Kizilkanat et al. 2007).

In einer etwa zeitgleich publizierten Studie aus den USA war die Tibia in 10 gleichgroße Segmente eingeteilt worden. Etwa drei Viertel der Foramina (77,4 %) befanden sich im dritten Segment was einem FI von 20 bis 30 % entsprach. Bei weiteren 15,1 % lag das Foramen im vierten Segment (Hallock et al. 1993). Auch diese Untersuchung machte deutlich, dass sich die Foramina über einen größeren Bereich hinweg erstrecken können (hier im Bereich von 10 bis 40 % der Tibialänge). Dies konnte auch in einer später durchgeführten Studie aus der Türkei bestätigt werden, wo sich für den FI eine Spannweite von 27 bis 47 % ergeben hatte, sofern nur ein Foramen vorhanden war (Durchschnitt: 33 %). Bei den selten vorkommenden zwei Foramina vergrößerte sich die Spannweite auf 29 bis 63 % (Kizilkanat et al. 2007).

Vergleichbar mit der eigenen Untersuchung fand sich in einer Studie aus Spanien nach Vermessung von 50 Tibiae eine Distanz des Foramens von 118 mm [116 mm re. bzw. 117 mm li.]. Bei einer Tibialänge von durchschnittlich 359 mm (re.) und 355 mm (li.) ergab sich ein FI von 32,9 bzw. 33,2 % (Collipal et al. 2007). Der FI war somit etwa um 1,5 %-Punkte größer als in der eigenen Studie. Vor dem Hintergrund, dass die Tibialänge bei Collipal et al. im Durchschnitt etwa 10 mm kleiner war als bei den eigenen Patienten, wäre eher ein

geringerer FI zu erwarten gewesen. Dies konnte in der eigenen Studie zumindest für die Gruppe der Frauen gezeigt werden, bei denen sich, bei kürzerer Tibia auch ein geringerer FI fand.

Ein ebenfalls etwas größerer FI fand sich in einer Studie aus Brasilien, in der neben anderen Röhrenknochen 142 Tibiae vermessen wurden. Der durchschnittliche FI lag bei 32,7 % und somit etwa um einen Prozentpunkt höher als in der eigenen Untersuchung. Auch hier fiel die große Spannweite von 26 bis 74 % auf. Sie war größer als bei den anderen langen Röhrenknochen, die gleichzeitig vermessen wurden (Pereira et al. 2011).

Vergleichsweise große Tibialängen hatten sich in einer Studie aus einer Küstenregion in Indien gezeigt. Sie lagen bei durchschnittlich 373 (re.) bzw. sogar 383 mm (li.) und somit höher als in der eigenen [369 mm] sowie den oben bereits zitierten Studien. Daneben war auch der FI mit 36 % (re.) und 34 % (li.) relativ hoch. Gegenüber der eigenen Untersuchung waren dies bis zu etwa 4,5 %-Punkte mehr (je nach Seite). Dies entsprach einer relativen Differenz von fast 15 % (Ankolekar et al. 2013). Vor diesem Hintergrund wird die Vermutung erhärtet, dass der FI von der Tibialänge abhängig ist. Die Distanz der Foramina korreliert folglich nicht vollkommen mit der Knochenlänge (Bsp.: Eine um 2 % größere Knochenlänge geht nicht mit einer entsprechenden Zunahme der Foramen-Distanz einher).

Weitgehend mit den eigenen Befunden übereinstimmend waren die Ergebnisse einer weiteren indischen Studie aus dem Norden des Landes. Hier fand sich bei den Männern bei einer durchschnittlichen Tibialänge von 378,2 mm [374,2 mm] eine Distanz des Foramens von 118,8 mm [118,3]. Bei den Frauen war die Tibialänge mit 352,1 mm etwas geringer als in der eigenen Studie [363,2 mm]; etwas kleiner war hier auch die Foramen-Distanz mit 111,2 mm [113,2] (jeweils rechte Seite der Tibia). Linksseitig ergaben sich allerdings Abweichungen, weil sowohl bei den Männern als auch den Frauen die Tibia um etwa 10 mm kürzer war (Gandhi et al. 2013). Derartige Seitendifferenzen lagen in der eigenen Studie nicht vor. Für den rechtsseitigen FI ergab sich bei Gandhi et al. ein Wert von 31,4 % (Männer) und 31,6 % (Frauen), was weitgehend mit dem eigenen Befund übereinstimmte [31,6 und 31,2 %].

Eine mit über 300 Tibiae relativ große Zahl an Präparaten fand sich in der weiter oben bereits zitierten Studie von Gupta und Gupta (2014). Der durchschnittliche Abstand des Forams lag hier bei 119,8 mm [115,7 und 117,0 mm]. Interessant war hierbei, dass die Spannweite mit 100 bis 149 mm im Vergleich zu anderen Studien kleiner war. Dies äußerte sich auch in Bezug zum FI, dessen Spannweite von 28,1 bis 37,6 % reichte; der Durchschnittswert lag bei 32,7 % (re) und 33,1 % (li.), wobei die Werte etwa um 1 bis 1,5 %-Punkte größer waren als bei den eigenen Patienten [31,4 bzw. 31,7 %]. Die Seitenlokalisierung hatte in der Studie von Gupta et al. keinen signifikanten Einfluss auf die Messgrößen.

Eine ebenfalls große Studie mit der Vermessung von 360 Tibiae wurde in Südafrika durchgeführt. Interessant war hierbei, dass der Einfluss von ethnischen Faktoren beurteilt werden konnte, da eine Differenzierung zwischen der schwarzen und weißen Bevölkerung vorgenommen wurde. Gleichzeitig wurde auch zwischen Männern und Frauen differenziert. Die Tibialänge war in dieser Untersuchung bei beiden ethnischen Gruppen größer als bei den eigenen Patienten – allerdings nur bei den Männern. So wies die schwarze Bevölkerung rechtsseitig eine durchschnittliche Länge von 395,0 mm auf und war somit rund 20 mm länger als bei den eigenen männlichen Patienten [374,2 mm]. Bei den Frauen fand sich eine durchschnittliche Länge von 362,3 mm [363,2 mm]. Bei der weißen Bevölkerung war die Tibia im Mittel etwa 10 mm kürzer. Obgleich bei der schwarzen Bevölkerung die Tibialänge größer als bei den Weißen war, spiegelte sich dies nicht im FI wider. Dieser war bei der Gruppe der Weißen mit 32,5 bis 33,9 % größer als bei den Schwarzen mit 31,2 bis 32,5 % (je nach Geschlecht und Seite) (Mazengenyua und Fasemore 2015). Das Ergebnis der weißen Bevölkerung entsprach in dieser Hinsicht dem eigenen Befund [31,0 bis 32,5 %; je nach Seite und Geschlecht].

Insgesamt lagen hier also ethnisch bedingte Unterschiede vor, diese waren jedoch gering und klinisch eher nicht von Bedeutung. Davon abgesehen konnte hier nicht bestätigt werden, dass große Tibialängen auch mit einem hohen FI assoziiert sein müssen. Da hier aber ohnehin eine relativ große Streubreite der einzelnen Ergebnisse vorliegt, dürfte auch dieser Aspekt nur von untergeordneter klinischer Relevanz sein. Eher von Belang ist die hier festgestellte FI-Spannweite, die über die Ethnien, Geschlechter und Tibiaseiten hinweg bei 25,5

bis 59,7 % lag und somit einen relativ großen Bereich des Knochens in vertikaler Richtung umfasste (Mazenganya und Fasemore 2015). Inwiefern die Autoren daraus ableiten, dass sich alle Foramina im proximalen Drittel der Tibia befinden, lässt sich nicht schlüssig nachvollziehen. Vermutlich war eher gemeint, dass dies meistens der Fall ist, wobei auch dies bei einem FI von 31 bis 33 % kaum schlüssig erscheint. Es müsste dann ja rund die Hälfte der Foramina im zweiten Drittel liegen, wenngleich aufgrund des Verteilungsmuster auch eher zum oberen Ende des zweiten Drittels hin. Tatsächlich findet sich in der weiter oben bereits zitierten Studie von Mohan et al. (2017) das Ergebnis, dass sich sogar über die Hälfte der Foramina (58 %) im mittleren Drittel der Tibia befinden. Dass der Anteil größer als 50 % war, erklärt sich hier durch den FI, der mit 34,7 % ebenfalls relativ hoch war bzw. höher als in den oben beschriebenen Studien sowie dem eigenen Befund [31,4 / 31,7 %].

Eine ähnliche Studie wie die von Mazenganya und Fasemore (2015) wurde wenige Jahre später nochmals durchgeführt; wiederum in Südafrika und wiederum mit Vergleich zwischen schwarzer und weißer Bevölkerung. Nunmehr waren aber die Foramendistanzen bei den Männern mit 107,7 mm (Schwarze) und 108,8 mm (Weiße) geringer als in der eigenen Untersuchung [re./li.: 118,3 / 121,5 mm]. Die Distanzen waren sogar kleiner als bei den Frauen der eigenen Studie. Dafür fanden sich nun bei den weißen Frauen höhere Werte (124,2 mm). Bei den schwarzen Frauen hingegen war die durchschnittliche Distanz mit 96,2 mm wiederum geringer als bei den Frauen der eigenen Studie [113,2 / 112,7 mm] (Fasemore et al. 2018).

Weshalb die Ergebnisse im Widerspruch zu den Ergebnissen von Mazenganya und Fasemore stehen, ist nicht nachvollziehbar, zumal es sich um dieselbe Arbeitsgruppe zu handeln scheint. Allerdings bestehen Zweifel an der Korrektheit der Daten, weil für die männlichen Weißen eine Distanz angegeben wurde, die deutlich geringer war als jene für die weiblichen Weißen (108,3 vs. 124,2). Hier drängt sich der Verdacht auf, dass Daten und Zahlen vertauscht wurden, denn es widerspricht den Erfahrungen und der Logik, dass die Foramendistanz bei den Frauen größer bzw. sogar deutlich größer sein soll als bei den Männern. Dies wäre nur dann plausibel, wenn die 53 Frauen in der Studie von Fasemore et al. deutlich

größer als die Männer gewesen wären bzw. eine größere Tibialänge aufgewiesen hätten. Zu beiden Punkten finden sich in der Publikation allerdings keine Angaben.

In Analogie zu den oben beschriebenen Studien konnte auch in einer weiteren Untersuchung (Indien; n=80) gezeigt werden, dass der FI um etwa 1 bis 1,5 %-Punkte höher lag als in der eigenen Untersuchung (Agrawal et al. 2016). Ein etwas geringerer FI fand sich hingegen in einer indischen Studie, die im selben Jahr publiziert worden war. Bei einer mittleren Tibialänge von 362 mm [369 mm] lag der durchschnittliche FI bei 29,0 % oder etwa 1,5 %-Punkte unterhalb des eigenen Ergebnisses [31,4 / 31,7 %] (Ambekar und Sukre 2016). Eher wiederum vergleichbar mit der eigenen Studie waren Tibialängen sowie der FI in einer ebenfalls aus Indien stammenden Untersuchung mit 60 Tibiae. Für die Länge fand sich hier ein Durchschnittswert von 365 mm. Der mittlere FI lag bei 32,0 % und somit nur geringfügig höher als bei den eigenen Patienten. Fast identisch war auch die Distanz des Foramens zur Oberkante der Tibia, die durchschnittlich 117 mm betragen hatte [116 / 117 mm] (Parmar et al. 2019). Ebenfalls gut mit den eigenen Ergebnissen übereinstimmend waren die Tibialängen aus einer aktuellen Studie, ebenfalls in Indien durchgeführt. Die durchschnittliche rechts- und linksseitige Länge lag bei 365 bzw. 368 mm. Der FI hingegen war mit 33,2 % (re.) um fast 2 %-Punkte höher als bei den eigenen Patienten. Für den linksseitigen FI war jedoch lediglich eine Differenz von 0,6 %-Punkten vorhanden (Aghera und Ahmed 2020). Eine FI-Differenz von etwa einem halben Prozentpunkt gegenüber dem eigenen Befund war zuvor auch von Udaya et al. (2017) (Indien) ermittelt worden. Die mittlere Tibialänge war um ca. 4 bis 7 mm größer, was einer relativen Differenz von 1 bis 2 % entsprach.

Insgesamt wird deutlich, dass es geschlechtsspezifische, aber vermutlich auch ethnisch bedingte Unterschiede hinsichtlich Tibialänge und Foramina-Index (FI) gibt. Der FI weist eine Abhängigkeit von der Tibialänge auf, wobei es sich um keine hundertprozentige Korrelation handelt. In den verschiedenen Studien fand sich ein durchschnittlicher FI von etwa 30 bis 35 %. Auffällig war, dass in den meisten Fällen der FI um etwa 1 bis 2 %-Punkte höher lag als in der eigenen Untersuchung. Da fast alle Studien aus Indien stammen stellt sich die Frage, inwiefern dieser Effekt ethnisch bedingt sein könnte. Einer größeren klinischen Re-

levanz dürfte diese Differenz allerdings kaum zukommen. Entscheidend scheint im Zusammenhang mit der vertikalen Lage des externen Foramens eher die Beobachtung zu sein, dass eine große Streubreite vorliegt. Im Einzelfall ist deshalb nicht vorherzusagen, ob das Foramen im ersten Tibiadrittel liegt oder doch eher im mittleren Drittel lokalisiert ist. Um Schädigungen im Bereich des externen Foramens ausschließen zu können, müsste folglich eher die gesamte obere Hälfte von chirurgischen Interventionen ausgespart werden, die weit proximal gelegenen Abschnitte vielleicht ausgenommen.

Bei derartigen Überlegungen wird jedoch vollkommen außer Acht gelassen, dass die A. nutricia auch an anderen Stellen durch Frakturen und chirurgische Interventionen gefährdet ist. Dies gilt vor allem für den knöchernen Kanal des Gefäßes zwischen dem proximal gelegenen Eintritt in die Kortikalis und dem weiter distal gelegen Übergang in das Knochenmark. In diesem Bereich besteht für die Nutritionsarterie keine Möglichkeit des Ausweichens, weshalb vor allem dieser knöcherne Kanal (TNAC) von Bedeutung ist, wenn es um die Frage der iatrogenen Schädigung geht. In der Literatur wurde aber bislang kaum auf diesen sensiblen Bereich eingegangen, wobei dies vor allem auf methodische Faktoren zurückgeführt werden kann: Am anatomischen Präparat lässt sich das interne Foramen nicht identifizieren, weshalb auch der TNAC nicht darstellbar ist. Dies gelingt nur mittels radiologischer Schichtaufnahmen. Eine derartige Methode wurde im Zusammenhang mit dem TNAC bisher nur in einer Studie angewandt (von der eigenen Untersuchung abgesehen) (Li et al. 2015). Bemerkenswert an der Studie von Li et al. war, dass sich ein FI fand, der mit 31,8 % in guter Übereinstimmung mit der eigenen Untersuchung war [31,4 / 31,7 %]. Zur Erinnerung: In fast allen anderen Studien war der FI höher. Dies legt den Schluss nahe, dass mittels der geeigneten radiologischen Methode eine genauere Bestimmung der Messpunkte möglich ist. Da es sich um eine Studie aus China handelte und die meisten anderen aus Indien stammten, könnten aber auch ethnische Faktoren eine Rolle spielen. Davon abgesehen verwirrt etwas die Angabe in der Tabelle von Li et al., in welcher der FI mit 30,3 (bei einem Foramen) bzw. 30,1 % (bei zwei Foramina) angegeben wird. Wie sich vor diesem Hintergrund ein mittlerer FI von 31,8 % ergeben soll, ist nicht nachvollziehbar. Da aber sowohl im Text zur Tabelle als auch in der Diskussion der FI mit 31,8 % angegeben wurde,

scheint es sich bei jenem Wert am ehesten um den korrekten Befund zu handeln (Li et al. 2015).

Interessant war in der Studie von Li et al., dass eine negative Korrelation zwischen dem FI und dem Alter festgestellt wurde. Inwiefern dies bedeutet, dass sich der FI mit zunehmendem Alter verkleinert, scheint jedoch fraglich. Dies würde voraussetzen, dass sich die Länge eines Röhrenknochens mit der Zeit verkleinert. Nur dann könnte sich auch der FI verringern. Alternativ müsste sich das Foramen sich nach proximal hinbewegen, was aber unwahrscheinlich sein dürfte, wenngleich auch nicht vollkommen unmöglich. Schließlich findet auch am gesunden Knochen lebenslang ein Remodelling statt (Rubin und Lanyon 1987; Burr 2002). Am wahrscheinlichsten ist aber anzunehmen, dass bei Li et al. die älteren Knochen von Patienten stammten, die kleiner waren als die Knochen von Jüngeren. Dies ist insofern plausibel, als dass sich die Körperlänge in den letzten Generationen deutlich vergrößert haben. Die Enkel sind heute meist größer als deren Großeltern.

In der Studie von Li et al. stand der TNAC im Vordergrund; auf das interne Foramen wurde nicht explizit eingegangen. Die TNAC-Befunde werden im folgenden Abschnitt näher dargestellt.

4.6 Länge tibialen Kanals der A. nutricia (NAC)

Neben der anatomischen Lage A. nutricia-Foramina kommt auch dem knöchernen Kanal des Gefäßes (NAC; Nutritional Artery Canal) eine wichtige Bedeutung zu. Entsprechend den beiden Ein- und Ausgangspforten (Foramina) liegt dieser Kanal ebenfalls meist posterior. Er bildet jenen Bereich ab, der nach Möglichkeit nicht durch operative Eingriffe beeinträchtigt werden sollte.

In der eigenen Untersuchung war der NAC 33,4 mm (rechts) bzw. 32,7 mm (links) lang, wobei die geringe Differenz von 0,7 mm nicht statistisch signifikant war. Gemessen an der Tibiallänge von 369 mm (beidseits) nahm der NAC einen Streckenanteil von etwa 9 % ein. Demgemäß würden gut 90 % des Knochens verbleiben, um zum Beispiel Verschraubungen

sicher anbringen zu können. Allerdings ist dieser große Bereich insofern nur von theoretischer Relevanz, als dass aus physiologischen Gründen auch andere Knochenanteile möglichst nicht durch das Einbringen von Schrauben oder Drähten iatrogen geschädigt werden sollten, wie etwa die endständigen Knorpelschichten. Dennoch verbleibt ein großer Teil des Tibiaschaftes für operative Stabilisierungen verfügbar, ohne dass das Risiko einer Schädigung des knöchernen Kanals der *A. nutricia* zu befürchten ist.

Während die Seitenlokalisation (re. vs. li.) keinen signifikanten Einfluss auf die Länge des NAC hatte, konnte festgestellt werden, dass sich hinsichtlich des Geschlechts ein signifikanter Unterschied ergeben hatte. Der NAC der rechten Tibia war bei Frauen um durchschnittlich 6,6 mm kleiner als bei den Männern ($30,2 \pm 13,2$ vs. $36,8 \pm 11,7$ mm; $p=0,008$). Auf der linken Tibiaseite war diese Differenz allerdings mit 5,4 mm etwas geringer und es wurde keine statistische Signifikanz mehr erreicht ($p=0,105$).

Die Beobachtung, dass der NAC bei Frauen etwa 15 bis 18 % kürzer war, konnte insofern nicht überraschen, als dass beim weiblichen Geschlecht aufgrund der geringeren Körperlänge auch die Tibia kürzer war als bei den Männern. Auf der rechten Seite betrug diese Differenz im Mittel 11 mm ($363,2 \pm 25,6$ vs. $374,2 \pm 22,8$ mm; $p=0,022$). Bemerkenswert war allerdings, dass die Tibialängen-Differenz gegenüber den Männern nur 2,9 % betrug, die entsprechende Differenz des NAC jedoch 17,9 % (rechts). Der NAC war beim weiblichen Geschlecht folglich deutlich kürzer als aufgrund der kürzeren Tibialänge zu erwarten gewesen wäre. Für die linke Tibiaseite hatten sich qualitativ analoge Verhältnisse ergeben (Differenz Tibialänge 2,9 %; Differenz NAC 15,2 %).

Da die ethnische Herkunft einen großen Einfluss auf die Körperlänge und somit auch auf die Länge der Tibia hat, seien an dieser Stelle exemplarisch nur einzelne Studienergebnisse zitiert, die solche Unterschiede deutlich machen. So wurden in einer indischen Untersuchung mittlere Längen von 361 (re.) bzw. 368 mm (li.) gemessen (Frauen und Männer) (Gupta und Gupta 2014). Das Ergebnis entsprach in etwa jenem, wie es bei der weiblichen Gruppe der eigenen Patienten ermittelt wurde [363 bzw. 364 mm]. Fast identische Befunde fanden sich auch bei Ankolekar et al. (2013), Ambekar und Sukre (2016), Mohan et al. (2017) und Parmar et al. (2019) (alle aus Indien).

Bei der schwarzen Bevölkerung aus Südafrika war die Tibialänge etwa 20 mm größer als in den oben zitierten Studien (Männer und Frauen zusammen 380 mm; Männer 395 mm; Frauen 362 mm) (Mazenganya und Fasemore 2015). Im Vergleich zu den eigenen Befunden war die Tibia der Männer ebenfalls um etwa 20 mm länger, bei den Frauen hingegen war die Tibialänge fast identisch mit der eigenen Messung [363 mm].

Geringere Längen als in der eigenen Studie fanden sich in einer Untersuchung aus der Türkei. Hier lag die durchschnittliche Tibialänge bei 358 mm (Männer und Frauen zusammen) und somit etwa einen Zentimeter unterhalb des eigenen Durchschnittswertes von 369 mm (Männer und Frauen zusammen) (Kizilkanat et al. 2007). Eine Länge von ebenfalls 358 mm fand sich ferner in einer Studie aus China (Li et al. 2015).

Zur Länge des Kanals der *A. nutricia* (NAC) liegen, mit einer Ausnahme, in den meisten bisher durchgeführten Studien keine Angaben vor. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass fast alle Untersuchungen an anatomischen Präparaten durchgeführt wurden. Davon abgesehen, dass meist nur die Eingangspforte der *A. nutricia* (externes Foramen) berücksichtigt wurde, wäre eine Messung des knöchernen Verlaufs des Kanals auch dann nur annähernd möglich, wenn Daten zum internen Foramen vorliegen würden. Hinreichend präzise Messungen sind im Grunde nur radiologisch möglich und dies auch nur dann, wenn entsprechende Schnittbilder verfügbar sind. Eine derartige Methode wurde vor einigen Jahren in China angewandt. Die Länge des Nutritionskanals wurde hierbei mit 51 ± 9 mm angegeben, sofern es sich um Tibiae mit nur einem externen Foramen handelte. Im Falle von zwei Foramina betrug die Länge des primären Kanals 41 ± 10 mm (Li et al. 2015). Die Ergebnisse sind insofern bemerkenswert, als dass in der eigenen Studie lediglich NAC-Längen von 33,4 (re.) bzw. 32,7 (li.) gemessen wurden, wobei die Werte bei den Männern größer als bei den Frauen waren (36,8 vs. 30,2 mm auf der rechten Seite).

Die Ergebnisse von Li et al. lassen sich insofern nur bedingt mit den eigenen Befunden vergleichen, da dort keine Differenzierung zwischen Männern und Frauen vorgenommen wurde. Es ist auch unbekannt, wie groß der Männer- oder Frauenanteil in jener Studie war. Ferner bezogen sich die Durchschnittswerte in der eigenen Untersuchung auf alle Knochen, unabhängig von der Zahl der Foramina, wobei stets das dominierende externe Foramen als

Referenz diene. Da in knapp acht Prozent der Fälle zwei oder mehr Foramina vorlagen, und der NAC bei multiplen Foramina kleiner ist (wie bei Li et al. gezeigt) dürfte also bei den eigenen Patienten die durchschnittliche Länge des NAC im Falle von nur einem Foramen etwas größer gewesen sein als etwa 33 mm (Männer und Frauen) bzw. 37 mm (Männer). Zumindest die Werte der Männer dürften folglich im Bereich dessen gelegen haben, wie dies bei Li et al. der Fall war (41 mm). Trotz dieser hypothetischen Überlegungen wird an dieser Stelle die Frage aufgeworfen, ob und inwiefern ethnische Faktoren hier eine Rolle spielen. Da bislang jedoch keine weiteren Studien vorliegen, in denen der NAC vermessen wurde oder in denen zumindest Informationen zur Lage des internen Foramens vorliegen, ist diese Frage nicht zu beantworten.

Unabhängig davon, dass die Frage derzeit mangels Daten noch nicht zu beantworten ist, gibt es zumindest Indizien, die in diese Richtung deuten. So konnten in der eigenen Studie geschlechtsspezifische Unterschiede aufgezeigt werden, die in ähnlicher Form auch für ethnische Unterschiede gelten könnten. Wie weiter oben bereits ausgeführt, war die Länge des NAC bei den Frauen deutlich geringer als aufgrund der geringeren Tibialänge zu erwarten gewesen wäre. Demgemäß konnten auch signifikante Unterschiede im Hinblick auf das Verhältnis zwischen der Tibialänge und der NAC-Länge (NAC/Tibia-Relation) ermittelt werden. Der prozentuale Anteil der NAC-Strecke an der Tibialänge war bei den Frauen um 1,5 %-Punkte geringer (rechte Seite: $8,3 \pm 3,5 \%$ vs. $9,8 \pm 3,0 \%$; $p=0,018$). Linksseitig hatte sich ein qualitativ ähnliches Verhältnis ergeben, die Differenz von 1,3 %-Punkten erreichte jedoch keine statistische Signifikanz mehr. Abgesehen davon wird deutlich, dass zwischen Frauen und Männern deutliche Unterschiede hinsichtlich der Anatomie des NAC vorliegen. Ähnliches wäre, zumindest theoretisch, auch für verschiedene ethnische Gruppen denkbar, zumal dann, wenn hier größere Differenzen der Körperlängen vorliegen. Wie gezeigt, korrelieren die unterschiedlichen Körperlängen bei Männern und Frauen nicht eindeutig mit den NAC-Längen.

4.7 Schlussfolgerung und Ausblick

Das wichtigste Versorgungsgefäß von langen Röhrenknochen, die A. nutricia, ist schon seit langem ins Interesse der klinischen Medizin gerückt. Im Hinblick auf die anatomischen Verhältnisse im Bereich der knöchernen Strukturen wurde bisher vor allem auf die Anzahl der Eintrittspforten (Foramina) sowie auf deren Lage in horizontaler und vertikaler Richtung fokussiert. Für die Tibia wurde dabei festgestellt, dass meist nur ein Foramen vorhanden ist und dass dessen relative Entfernung vom oberen Tibiaende im Durchschnitt etwa 30 bis 33 % beträgt, bezogen auf die gesamte Länge des Knochens. In fast allen Fällen ist das Foramen posterior bzw. postero-lateral lokalisiert. Dies konnte auch in der eigenen Untersuchung bestätigt werden, wobei erstmals die genaue transversale Lage in Winkelgraden bestimmt worden war. In Bezug zur Fibula als Fixpunkt wurde hierbei ein durchschnittlicher Winkel von 20 bis 35 Grad ermittelt. Individuell lagen hierbei allerdings größere Abweichungen vor, was sich in Standardabweichungen äußerte, die im Bereich von bis zu etwa 20 Grad lagen. Daraus lässt sich ableiten, dass beim einzelnen Patienten die transversale Lage nicht winkelgenau vorhersagen lässt. Dasselbe gilt im Übrigen auch für die vertikale Lage, bei welcher der Wert von 30 bis 33 % ebenfalls als Mittelwert zu verstehen ist. Die interindividuelle Streubreite war allerdings nicht so groß wie bei der transversalen Lage (SD etwa 3 bis 4 %). Aus diesem Grund lagen die meisten Eintrittspforten auch innerhalb des oberen Drittels der Tibia, wie dies auch in der Literatur meist angegeben worden ist. Aus den beschriebenen Lageverhältnissen lässt sich jedoch nicht ableiten, dass die mittleren und distalen Drittel gefahrlos durch chirurgische Eingriffe manipuliert werden können, etwa durch das Einbringen von Schrauben oder Drähten. Vielmehr ist im Hinblick auf die anatomischen Verhältnisse der A. nutricia nicht allein deren Eintrittspforte (externes Foramen; EF) maßgeblich, sondern vor allem der Bereich zwischen Eintritts- und Austrittspforte, der als Kanal der A. nutricia (NAC; Nutrient Artery Canal) bezeichnet wird. Auf diesen wichtigen und entscheidenden Aspekt wurde aus methodischen Gründen bislang in keiner Studie eingegangen, von einer Ausnahme abgesehen: der Studie von Li et al. (2015). In jener Studie wurde ein ähnlicher Ansatz wie in der eigenen Untersuchung gewählt, wodurch es möglich wurde, nunmehr auch den NAC der Tibia (TNAC) anatomisch zu beschreiben

bzw. zu vermessen. Damit wurde erstmalig der Fokus auf die entscheidende Schwachstelle der A. nutricia gelegt. Jede Manipulation in diesem Bereich, frakturbedingt oder iatrogen, geht mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Störung der Blutversorgung einher, da die A. nutricia in ihrem knöchernen Kanal keine Ausweichmöglichkeiten besitzt.

Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen und Ausführungen wird deutlich, dass bei chirurgischen Eingriffen an der Tibia nicht nur der Bereich des oberen Drittels gemieden werden sollte, sondern vielmehr auch der Bereich des NAC, der weit in das mittlere Drittel hineinreicht. Dies gilt auch für den antero-medialen Bereich, wenn entsprechend den chirurgischen Leitlinien, Schanzsche Schrauben zur Anlage eines Fixateurs Exterieur eingebracht werden. Durch die bicortikale Fixierung der Schrauben können diese, vor allem im mittleren Tibia-Drittel, auf den TNAC in der posterioren bzw. postero-lateralen Facies treffen und damit eine Verletzung der A. nutricia herbeiführen (Almansour et al. 2020b).

Abgesehen davon, dass aufgrund theoretischer Überlegungen eine Schädigung der A. nutricia vermieden werden sollte, ist bislang nicht sicher geklärt, inwiefern iatrogene Verletzungen des Gefäßes durch Plattenosteosynthesen oder Fixateur-Exterieur-Behandlungen zu Knochenheilungsstörungen oder Pseudarthrosen führen. Strittig ist in diesem Zusammenhang auch, in welcher Weise eine Stabilisierung der Fraktur durch Marknagelung erfolgen sollte. Kontrovers wird vor allem die Frage diskutiert, ob vor dem Einbringen des Nagels eine Aufbohrung erfolgen sollte. Hintergrund der Kontroversen sind tierexperimentelle Studien, die gezeigt haben, dass durch den Vorgang des Aufbohrens beträchtliche kortikale Durchblutungsstörungen entstehen (Attal und Blauth 2010). Vor dem Hintergrund der zahlreichen Studien zur Anatomie der A. nutricia, einschließlich der eigenen Ergebnisse, ist dies nicht weiter überraschend. Im Bereich des Überganges vom knöchernen Kanal in den Markraum muss es bei der Aufbohrung zwangsläufig zur Zerstörung des Gefäßes kommen, da dieses dem Bohrer nicht ausweichen kann. Dies konnte auch in einer Studie aus Deutschland nachgewiesen werden, bei der es nach Aufbohrung in allen Fällen zu einer vollständigen Zerstörung der A. nutricia kam. Bei der unaufgebohrten Technik hingegen waren lediglich 16,6 % der Gefäße komplett zerstört (50 % partiell) (Paar et al. 2000). Aus solchen Gründen wurde vielfach der unaufgebohrten Marknagelung der Vorzug eingeräumt, denn bei

diesem Verfahren kann es gelingen, die A. nutrica zu schonen, wie von Paar et al. gezeigt. Dies gilt vor allem dann, wenn Fixierungsstäbe oder -Röhren („Nägel“) zum Einsatz kommen, die im posterioren Bereich eine Aussparung aufweisen oder abgeflacht sind (vgl. Abb. 1010 auf S. 20 in der Einleitung). Allerdings geht das Verfahren der unaufgebohrten Marknagelung methodisch bedingt mit einer geringeren Stabilität einher, was wiederum das Risiko für Knochenheilungsstörungen und Pseudarthrosen erhöht. Tatsächlich konnte im Rahmen einer Metaanalyse, in die prospektive und randomisierte Studien eingeschlossen waren, gezeigt werden, dass ohne Aufbohrung signifikant höhere Raten an Pseudarthrosen auftreten als bei aufgebohrter Marknagelung (Bhandari et al. 2000). Dass nach unaufgebohrter Marknagelung häufiger Komplikationen auftreten, konnte von der Arbeitsgruppe um Bhandari auch in einer späteren kontrollierten Multicenterstudie an über 1.300 Patienten mit Tibiaschaft-Frakturen bestätigt werden. Besonders von Knochenheilungsstörungen betroffen waren Patienten mit offenen Frakturen (Bhandari et al. 2008).

Insgesamt haben sich die Ergebnisse aus den tierexperimentellen Studien nicht in diesem Sinne auf den klinischen Verlauf beim Menschen übertragen lassen, als dass die Aufbohrung häufiger zu Störungen des Heilungsverlaufes führt als die schonendere Marknagelung ohne Aufbohrung. Dies ist insofern etwas überraschend, als dass durch die Aufbohrung eine Unterbrechung der A. nutricia praktisch nicht zu vermeiden ist. Die logische Konsequenz daraus ist eine Störung der Blutversorgung, die ausgeprägter ist als beim Verzicht auf die Bohrung. Dass dennoch die Rate der Knochenheilungsstörungen geringer ist, dürfte vor allem dem Umstand geschuldet sein, dass die Instabilität bei der unaufgebohrten Marknagelung methodisch bedingt größer ist: Der Durchmesser der Nägel ist kleiner und sie werden locker bzw. ohne Anpressdruck eingebracht. Der Vorteil der Schonung von Blutgefäßen gleicht offensichtlich nicht den Nachteil der Instabilität aus. Daraus lässt sich allerdings nicht ableiten, dass die Störung der Durchblutung bzw. die Schädigung der A. nutricia keine tragende Rolle bei Knochenheilungsstörungen spielt. Sie ist lediglich im Falle der aufgebohrten Marknagelung nicht zu vermeiden. Wäre sie vermeidbar, würde die Rate der Knochenheilungsstörungen vermutlich noch geringer. Diese Hypothese ist allerdings praktisch nicht verifizierbar. Bei anderen Methoden der Frakturbehandlung kann allerdings durchaus eine Schonung der A. nutricia erreicht werden. Deshalb sollten nach Möglichkeit

nur jene Bereiche der Tibia iatrogen geschädigt werden, bei denen das Risiko einer Affektion der A. nutricia gering oder möglichst nicht vorhanden ist.

Zusammenfassend lässt sich abschließend feststellen, dass im Rahmen dieser Untersuchung die Ergebnisse der vorausgegangenen Studien bestätigt werden konnten. Außerdem konnten einige Befunde neu erhoben werden. Von großer Bedeutung war vor allem, dass im Rahmen dieser Studie auch der knöcherne Kanal der tibialen A. nutricia untersucht wurde, wobei erstmalig auch die Lage des internen Foramens bzw. des Überganges in den Markraum vermessen worden ist. Ferner wurde erstmalig auch die Lage in der transversalen Ebene näher beschrieben (anguläre Lokalisation). Anhand der umfassenden Analysen konnte auch gezeigt werden, dass der Seitenlokalisierung keine signifikante Bedeutung zukommt. Auffälligkeiten hatten sich jedoch im Hinblick auf das Geschlecht gezeigt. So waren die Distanzen der beiden Foramina in Relation zur Tibialänge bei den Frauen kleiner als bei den Männern. Dasselbe galt auch für die Länge des Nutritions-Kanals bzw. für den Foraminal-Index (FI), der bei Frauen etwas kleiner war. Vor dem Hintergrund, dass bei allen Variablen eine gewisse Streubreite vorlag, dürfte den Differenzen klinisch allerdings keine größere Bedeutung zukommen. Unabhängig davon war bemerkenswert, dass die relative Distanz des externen Foramens bei fast allen anderen Studien um etwa 1 bis 2 %-Punkte größer war als bei den eigenen Patienten. Ein Befund, der mit dem eigenen Ergebnis übereinstimmte, fand sich lediglich in der Studie von Li et al. (2005), die methodisch denselben Ansatz verfolgte (Auswertung von radiologischen Schichtaufnahmen). Dies wirft die Frage auf, weshalb die Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen hier Abweichungen nach oben aufwies. Auffällig war in diesem Zusammenhang, dass die Mehrzahl dieser Studien aus Indien stammte, weshalb die Hypothese von genetischen Einflüssen zur Diskussion gestellt werden muss. Dies gilt umso mehr, als dass aus dem europäischen Raum fast keine bzw. gar keine Studien aus den vergangenen 20 Jahren verfügbar sind. Dieser Mangel sollte dringend behoben werden, wobei weitere Studien wünschenswert wären, bei denen nicht nur anatomisches Material untersucht wird, sondern vielmehr auch radiologische Auswertungen mittels Schichtaufnahmen vorgenommen werden. Nur mittels solcher Methoden ist auch eine Beurteilung des internen Foramens und damit des Kanals der A. nutricia möglich. Dies ist von immenser Bedeutung, da vor allem der Lage und dem Ausmaß dieses Kanals

die eigentlich tragende Rolle zukommt, und nicht dem externen Foramen, das bei fast allen Studien bislang im Vordergrund stand. Dabei wurde möglicherweise der Eindruck suggeriert, dass die Kenntnis der Anatomie dieser Variable ausreicht, um Komplikationen bzw. iatrogene Schädigungen der A. nutricia vermeiden zu können (Abb. 26). Wenn dem tatsächlich so wäre, so käme dies einem fatalen Trugschluss gleich.

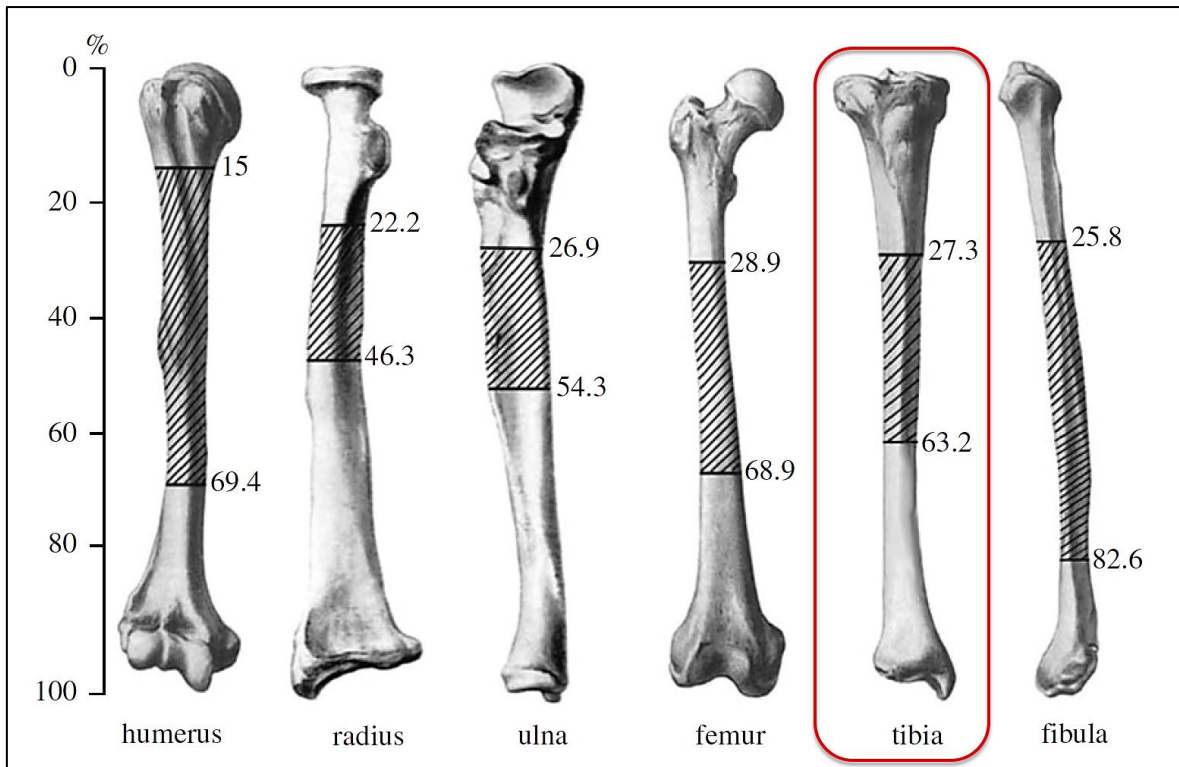


Abb. 26: Spannweite des FI (Foraminal-Index) bei langen Röhrenknochen.

Die Abbildung könnte zu dem Trugschluss verleiten, dass der sensible Bereich für die Tibia bei 27,3 bis 63,2 % liegt. Dieser Bereich umfasst jedoch nur die mögliche Lage des externen Foramens; die Kanal der A. nutricia als entscheidende Schwachstelle bleibt außen vor.

Quelle: Kizilkanat et al. (2007).

Abgesehen davon, dass die eigenen Ergebnisse weiter untermauert werden sollten und dringender Bedarf an Studien aus Europa, aber auch aus den USA und anderen Ländern besteht, sollte dringend näher untersucht werden, inwiefern gezielte Frakturbehandlungen unter Berücksichtigung der anatomischen Strukturen bzw. unter Schonung der A. nutricia (soweit möglich) eine Verminderung von Knochenheilungsstörungen und Pseudarthrosen

ermöglichen. Anders als für die Technik der Marknagelung liegen zu dieser Fragestellung im Hinblick auf Plattenosteosynthesen und Fixateur Exterieur bislang keine Ergebnisse vor. Im Rahmen einer aktuelleren Studie aus Deutschland konnte jedoch zumindest gezeigt werden, dass es nach Tibiafrakturen und Behandlungen mittels Fixateur Exterieur in 26 % der Fälle zu einer kompletten und in 12 % zu einer partiellen Schädigung der A. nutricia gekommen ist (Almansour et al. 2020b). Offen bleibt allerdings noch die Frage, inwiefern derartige Schädigungen den Heilungsverlauf beeinflussen. Vermutlich dürften sich hier jedoch kontrollierte prospektive Studien als schwierig erweisen, weshalb man zur Klärung von solchen Fragen zunächst auf retrospektive Daten angewiesen sein wird. Inwiefern solche Daten tatsächlich verfügbar sind, wäre zu klären. Es dürfte aber kein leichtes Unterfangen sein, Fallgruppen zu finden, die methodisch hinreichend miteinander vergleichbar sind. Davon abgesehen handelt es sich bei Gefäßverletzungen durch Frakturen und deren Behandlungen um komplexe Vorgänge, wobei bestimmte Störungen der Durchblutung nicht immer mit negativen Folgen verbunden sein müssen. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass die Blutflussrate nach Frakturen 24 Stunden nach der Verletzung drei bis sechsmal größer war als auf der gesunden Seite (Ashcroft et al. 1992). Ferner konnte im Tierexperiment demonstriert werden, dass nach Marknagelung der Blutfluss erhöht war, verglichen mit der kontralateralen Seite, die mittels Plattenosteosynthese behandelt worden war (Rand et al. 1981). Vor diesem Hintergrund ist auch die verzögerte Knochenheilung nach Frakturen und deren Behandlungen als multifaktorieller Prozess zu betrachten, der längst nicht in seiner gesamten Tragweite aufgeklärt ist. Unstrittig dürfte sein, dass der Erhaltung oder Wiederherstellung des Blutflusses eine Schlüsselrolle bei der Frakturheilung zukommt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass Störungen oder Unterbrechungen des Blutflusses zur Hypoxie führen, wodurch wiederum kompensatorische angiogene Prozesse angestoßen werden (Tomlinson und Silva 2013). Es bleibt also die Frage offen, in welchem Ausmaß Beeinträchtigungen der A. nutricia die Knochenheilung beeinflussen. Davon abgesehen sollte ein wichtiger Aspekt nicht vergessen werden: Neben der suffizienten Blutversorgung spielt bei der Knochenheilung vor allem die Stabilität der behandelten Fraktur eine (im wörtlichen Sinne) tragende Rolle. Sofern also eine Schonung der A. nutricia zu Lasten der Stabilität geht, dürfte dies dem Heilungsverlauf nicht dienlich sein.

5 Zusammenfassung

Hintergrund: Die Blutversorgung ist für alle Organe und Gewebe von großer Relevanz, was auch die langen Röhrenknochen und hier speziell die Tibia miteinschließt. Beim Heilungsprozess von Frakturen ist ein intaktes Blutgefäßsystem essenziell für Knochenaufbau bzw. Kallusbildung. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der A. nutricia zu, die sowohl durch die Fraktur als auch iatrogen bzw. durch die Behandlung geschädigt werden kann. Um diesem Problem entgegenzutreten zu können, ist die genaue Kenntnis der anatomischen Lage dieses Gefäßes wichtig. Ziel dieser Studie war es, die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren und darüber hinaus neue Befunde zu erheben. Im Zentrum des Interesses stand dabei der knöcherne Kanal der tibialen A. nutricia (TNAC; Tibial Nutrient Artery Canal).

Methodik: Es wurden die radiologischen Befunde von 106 Patienten im durchschnittlichen Alter von 70,1 Jahren ausgewertet, bei denen zwischen Januar und Juni 2018 eine CT-Angiographie durchgeführt worden war und bei denen vollständige CTA-Befunde der Tibia vorlagen. Anhand dieser Aufnahmen wurden verschiedene morphometrische und anatomische Parameter ermittelt.

Ergebnisse: Bei über 90 % der untersuchten Tibiae fand sich nur eine Eintrittspforte der A. nutricia (externes Foramen; EF). Lediglich für die linke Tibia in der Gruppe der Männer war dieser Anteil mit 88,5 % kleiner. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Seitenlokalisation oder des Geschlechts konnten aber nicht festgestellt werden. Sowohl die externen als auch die internen Foramina (IF) waren in mehr als 95 % der Fälle posterior lokalisiert. Wiederum bestanden auch hier keine geschlechts- oder seitenbezogenen Unterschiede mit statistischer Signifikanz. Die durchschnittliche Tibialänge war bei den Männern größer als bei den Frauen (374,2 vs. 363,2 mm; $p=0,022$; rechte Seite). Linksseitig war der Befund nahezu identisch. Ebenfalls größer als bei den Frauen war die mittlere Distanz des EF und des IF (EF: 118,3 vs. 113,2 mm; $p=0,042$; IF: 155,1 vs. 144,0 mm; $p<0,001$; rechte Seite). Linksseitig waren die Befunde wiederum qualitativ ähnlich. Der Foraminal-Index (relative Distanz des EF in Bezug zur Tibialänge) wies keine signifikante Differenz zwischen den Geschlechtern auf. Für den FI des internen Foramens hatten sich jedoch auf beiden Seiten

signifikante Unterschiede ergeben (Männer vs. Frauen: 41,5 vs. 39,7 %; $p=0,004$; rechte Seite bzw. 42,0 vs. 39,2 %; $p=0,005$; linke Seite). Die Länge des TNAC war bei Männern ebenfalls größer (36,8 vs. 30,2 mm; $p=0,008$; $p=0,008$; rechte Seite). Linksseitig war diese Differenz geringer und statistisch nicht signifikant. Ähnliches galt auch für den TNAC in Relation zur Tibialänge (Männer vs. Frauen: 9,8 vs. 8,3 %; $p=0,018$; rechte Seite bzw. 9,5 vs. 8,2 %; $p=0,154$; linke Seite). Für keinen dieser Variablen konnte seitenspezifisch ein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Berücksichtigt man die jeweils 10. und 90. Perzentile, so liegen externes und internes Foramen in einem Bereich von etwa 100 bis 180 mm (Männer) bzw. 100 bis 165 mm (Frauen).

Schlussfolgerung: Es konnten für die meisten der untersuchten Variablen Unterschiede zwischen Männern und Frauen aufgezeigt werden, wobei teilweise auch eine statistische Signifikanz vorlag. In der klinischen Praxis dürften die eher geringen Differenzen aber keine größere Bedeutung haben, da individuell eine große Spannweite vorlag. Von klinischer Relevanz war hingegen, dass im Rahmen dieser Studie erstmalig auch Daten zum internen Foramen erhoben wurden und dass der eigentliche kritische Bereich der Tibia charakterisiert werden konnte: der TNAC. Die klinische Relevanz der Ergebnisse im Hinblick auf Komplikationen wie Knochenheilungsverzögerungen oder Pseudarthrosen bedarf ergänzender Studien.

6 Literaturverzeichnis

1. Afzal, E; Sherin, F; Khan, O; Siddiqui, N Hussain (2017): Diaphyseal Nutrient Foramina In Dried Human Adult Long Bones Of Lower Limb In Pakistan. *J Ayub Med Coll Abbottabad* 29: S. 623-625.
2. Aghera, B R.; Ahmed, S (2020): Morphological and Morphometric Study of Nutrient Foramen of Tibia and its Clinical Implication in the South Rajasthan Region. *Int Arch Bio-med Clin Res* 6: S. 4-7.
3. Agrawal, N; Tiwari, A; Parmar, A (2016): Topography and indexing of nutrient foramina of tibia—a study in Vindhya region. *Int J Med Sci Public Health* 5: S. 1000-1004.
4. Almansour, H; Armoutsis, E; Reumann, M K.; Nikolaou, K; Springer, F (2020a): The Anatomy of the Tibial Nutrient Artery Canal-An Investigation of 106 Patients Using Multi-Detector Computed Tomography. *J Clin Med* 9.
5. Almansour, H; Jacoby, J; Baumgartner, H; Reumann, M K.; Nikolaou, K; Springer, F (2020b): Injury of the Tibial Nutrient Artery Canal during External Fixation for Lower Extremity Fractures: A Computed Tomography Study. *J Clin Med* 9.
6. Ambekar, S A.; Sukre, S B. (2016): Diaphyseal nutrient foramen of lower limb long bones: variations and importance. *Int J Anat Res* 4: S. 2684-2688.
7. Anetai, H; Kinose, S; Sakamoto, R; Onodera, R; Kato, K; Kawasaki, Y; Miyaki, T; Kudoh, H; Sakai, T; Ichimura, K (2021): Anatomic characterization of the tibial and fibular nutrient arteries in humans. *Anat Sci Int* 96: S. 378-385.
8. Ankolekar, V H.; Quadros, L S.; D'souza, A S. (2013): Nutrient foramen in tibia – A study in coastal region of Karnataka. *IOSR-JDMS* 10: S. 75-77.
9. Antonova, E; Le, T Kim; Burge, R; Mershon, J (2013): Tibia shaft fractures: costly burden of nonunions. *BMC Musculoskelet Disord* 14: S. 42.
10. Ashcroft, G P.; Evans, N T.; Roeda, D; Dodd, M; Mallard, J R.; Porter, R W.; Smith, F W. (1992): Measurement of blood flow in tibial fracture patients using positron emission tomography. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 74: S. 673-677.
11. Attal, R; Blauth, M (2010): Unaufgebohrte marknagelung. *Orthopade* 39: S. 182-191.
12. Audigé, L; Griffin, D; Bhandari, M; Kellam, J; Rüedi, T P. (2005): Path analysis of factors for delayed healing and nonunion in 416 operatively treated tibial shaft fractures. *Clin Orthop Relat Res* 438: S. 221-232.
13. Bahney, C S.; Hu, D P.; Miclau, T; Marcucio, R S. (2015): The multifaceted role of the vasculature in endochondral fracture repair. *Front Endocrinol (Lausanne)* 6: S. 4.
14. Bhandari, M; Guyatt, G; Tornetta, P; Schemitsch, E H.; Swiontkowski, M; Sanders, D; Walter, S D. (2008): Randomized trial of reamed and unreamed intramedullary nailing of tibial shaft fractures. *J Bone Joint Surg Am* 90: S. 2567-2578.

15. Bhandari, M; Guyatt, G H.; Tong, D; Adili, A; Shaughnessy, S G. (2000): Reamed versus nonreamed intramedullary nailing of lower extremity long bone fractures: a systematic overview and meta-analysis. *J Orthop Trauma* 14: S. 2-9.
16. Bishop, J A.; Palanca, A A.; Bellino, M J.; Lowenberg, D W. (2012): Assessment of compromised fracture healing. *J Am Acad Orthop Surg* 20: S. 273-282.
17. Bode, G; Strohm, P C.; Südkamp, N P.; Hammer, T O. (2012): Tibial shaft fractures - management and treatment options. A review of the current literature. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech* 79: S. 499-505.
18. Böhler, L (1963): *Die Technik der Knochenbruchbehandlung* (13. Aufl.). Wien, Bonn: Wilhelm Maudrich Wien.
19. Borrelli, J; Prickett, W; Song, E; Becker, D; Ricci, W (2002): Extraosseous blood supply of the tibia and the effects of different plating techniques: a human cadaveric study. *J Orthop Trauma* 16: S. 691-695.
20. Burr, D B. (2002): Targeted and nontargeted remodeling. *Bone* 30: S. 2-4.
21. Busse, J W.; Morton, E; Lacchetti, C; Guyatt, G H.; Bhandari, M (2008): Current management of tibial shaft fractures: a survey of 450 Canadian orthopedic trauma surgeons. *Acta Orthop* 79: S. 689-694.
22. Calori, G M.; Mazza, E; Colombo, M; Ripamonti, C; Tagliabue, L (2011): Treatment of long bone non-unions with polytherapy: indications and clinical results. *Injury* 42: S. 587-590.
23. Clarke, B (2008): Normal bone anatomy and physiology. *Clin J Am Soc Nephrol* 3 Suppl 3: S131-9.
24. Collipal, E; Vargas, R; Parra, X; Silva, H; Del Sol, M (2007): Diaphyseal Nutrient Foramina in the Femur, Tibia and Fibula Bones. *Int. J. Morphol.* 25.
25. Court-Brown, C M.; Caesar, B (2006): Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury* 37: S. 691-697.
26. Egol, K A.; Koval, K J.; Zuckerman, J (2018): Tibia and Fibula Shaft Fractures. In: Egol, KA., Koval, KJ. und Zuckerman, J (Hg.): *Handbook of Fractures* (6. Aufl.). Philadelphia, New York, London: Wolters Kluwer: S. 458-467.
27. Einhorn, T A.; Gerstenfeld, L C. (2015): Fracture healing: mechanisms and interventions. *Nat Rev Rheumatol* 11: S. 45-54.
28. Ekegren, C L.; Edwards, E R.; Steiger, R de; Gabbe, B J. (2018): Incidence, Costs and Predictors of Non-Union, Delayed Union and Mal-Union Following Long Bone Fracture. *Int J Environ Res Public Health* 15.
29. Fasemore, M D.; Bidmos, M A.; Mokoena, P; Imam, A; Billings, B K.; Mazenganya, P (2018): Dimensions around the nutrient foramina of the tibia and fibula in the estimation of sex. *Forensic Sci Int* 287: 222.e1-222.e7.

30. Feydy, A; Drapé, J; Beret, E; Sarazin, L; Pessis, E; Minoui, A; Chevrot, A (1998): Longitudinal stress fractures of the tibia: comparative study of CT and MR imaging. *Eur Radiol* 8: S. 598-602.
31. Filipowska, J; Tomaszewski, K A.; Niedźwiedzki, Ł; Walocha, J A.; Niedźwiedzki, T (2017): The role of vasculature in bone development, regeneration and proper systemic functioning. *Angiogenesis* 20: S. 291-302.
32. Forriol Campos, F; Gomez Pellico, L; Gianonatti Alias, M; Fernandez-Valencia, R (1987): A study of the nutrient foramina in human long bones. *Surg Radiol Anat* 9: S. 251-255.
33. Gandhi, S; Singla, R K.; Suri, R K.; Mehta, V (2013): Diaphyseal Nutrient Foramina of Adult Human Tibia -its Positional Anatomy and Clinical Implications. *Rev Arg de Anat Clin* 5: S. 222-228.
34. Goldhahn, S; Moser, R; Bigler, R; Matter, P (2000): Behandlungsmethoden und -ergebnisse von Tibiaschaftfrakturen in der Schweiz. Eine prospektive multizentrische Studie der AO-Schweiz. *Swiss Surg* 6: S. 315-322.
35. Greaney, R B.; Gerber, F H.; Laughlin, R L.; Kmet, J P.; Metz, C D.; Kilcheski, T S.; Rao, B R.; Silverman, E D. (1983): Distribution and natural history of stress fractures in U.S. Marine recruits. *Radiology* 146: S. 339-346.
36. Green, J R.; Reeve, J; Tellez, M; Veall, N; Wootton, R (1987): Skeletal blood flow in metabolic disorders of the skeleton. *Bone* 8: S. 293-297.
37. Guadalupe-Grau, A; Fuentes, T; Guerra, B; Calbet, J A. L. (2009): Exercise and bone mass in adults. *Sports Med* 39: S. 439-468.
38. Güntz, E (1944): Die Anwendung der Marknagelung nach Küntscher bei orthopädischen Knochenoperationen. *Arch orthop Unfall-Chir* 43: S. 408-426.
39. Gupta, R K.; Gupta, A K. (2014): A study of diaphyseal nutrient foramina in human tibia. *Nat J Med Res* 4: 310-313.
40. Hak, D J.; Fitzpatrick, D; Bishop, J A.; Marsh, J Lawrence; Tilp, S; Schnettler, R; Simpson, H; Alt, V (2014): Delayed union and nonunions: epidemiology, clinical issues, and financial aspects. *Injury* 45 Suppl 2: S3-7.
41. Hallock, G G.; Anous, M M.; Sheridan, B C. (1993): The surgical anatomy of the principal nutrient vessel of the tibia. *Plast Reconstr Surg* 92: S. 49-54.
42. Hankenson, K D.; Dishowitz, M; Gray, C; Schenker, M (2011): Angiogenesis in bone regeneration. *Injury* 42: S. 556-561.
43. Harder, L; Kuster, M (2011): Frakturen, Gelenk- und Weichteilverletzungen. In: Grifka, J (Hg.): *Orthopädie und Unfallchirurgie*. Unter Mitarbeit von Markus Kuster. Berlin, Heidelberg: Springer: S. 355-382.
44. Jeannet, J-P (2019): *Leading a Surgical Revolution*. Cham: Springer International Publishing, zuletzt geprüft am 29.04.2022.

45. Kelly, P J.; Nelson, G E.; Peterson, L F.A.; Bulbulian, A H. (1961): The Blood Supply of the Tibia. *Surgical Clinics of North America* 41: S. 1463-1471.
46. Kfuri, M; Belangro, W D. (2016): Proximal Tibial Shaft Fractures. In: Tejjwani, NC. (Hg.): *Fractures of the Tibia. A Clinical Casebook*. Cham: Springer: S. 325-339.
47. Kim, J; Yoon, H J.; Yoo, J J.; Kim, H J. (2013): Multiplanar reformation computed tomogram is better than MR imaging in decision making for apparently isolated fractures of the greater trochanter. *J Orthop Trauma* 27: e181-5.
48. Kirschner, M H.; Menck, J; Hennerbichler, A; Gaber, O; Hofmann, G O. (1998): Importance of arterial blood supply to the femur and tibia for transplantation of vascularized femoral diaphyses and knee joints. *World J Surg* 22: 845-51; discussion 852.
49. Kizilkanat, E; Boyan, N; Ozsahin, E T.; Soames, R; Oguz, O (2007): Location, number and clinical significance of nutrient foramina in human long bones. *Annals of anatomy = Anatomischer Anzeiger : official organ of the Anatomische Gesellschaft* 189: S. 87-95.
50. Küntscher, G (1940): Die Marknagelung von Knochenbrüchen. *Klin Wochenschr* 19: S. 833-835.
51. Küntscher, G (1959): Die Technik des Aufweitens der Markhöhle. *Chirurg* 30: S. 28-35.
52. Larsen, P; Elsoe, R; Hansen, S Hope; Graven-Nielsen, T; Laessoe, U; Rasmussen, S (2015): Incidence and epidemiology of tibial shaft fractures. *Injury* 46: S. 746-750.
53. Lentz, W (1980): 40 Jahre Marknagelung nach Küntscher. *Langenbecks Arch Chir* 352: S. 353-356.
54. Li, J; Zhang, H; Yin, P; Su, X; Zhao, Z; Zhou, J; Li, C; Li, Z; Zhang, L; Tang, P (2015): A New Measurement Technique of the Characteristics of Nutrient Artery Canals in Tibias Using Materialise's Interactive Medical Image Control System Software. *Biomed Res Int* 2015: S. 171672.
55. Lin, L; Liu, Y; Lin, C; Zhou, Y; Feng, Y; Shui, X; Yu, K; Lu, X; Hong, J; Yu, Y (2018): Comparison of three fixation methods in treatment of tibial fracture in adolescents. *ANZ J Surg* 88: E480-E485.
56. Macnab, I; Haas, W G. de (1974): The role of periosteal blood supply in the healing of fractures of the tibia. *Clin Orthop Relat Res*: S. 27-33.
57. Malukar, O; Joshi, H (2011): Diaphysial Nutrient Foramina In Long Bones And Miniature Long Bones. *Natl J Integrated Res Med* 2: S. 23-26.
58. Märdian, S; Schwabe, P; Schaser, K-D (2015): Tibiaschaftfrakturen. *Z Orthop Unfall* 153: 99-117; quiz 118-9.
59. Marenzana, M; Arnett, T R. (2013): The Key Role of the Blood Supply to Bone. *Bone Res* 1: S. 203-215.
60. Marsell, R; Einhorn, T A. (2011): The biology of fracture healing. *Injury* 42: S. 551-555.

61. Matityahu, A M.; Marmor, M T. (2015): Tibial Shaft Fractures. In: Browner, BD. (Hg.): Skeletal trauma (5. Aufl.). Philadelphia, Pa.: Elsevier Saunders: S. 2039-2119.
62. Mayr, E (2002): Unterschenkelfrakturen. *Chirurg* 73: 642-61; quiz 662-3.
63. Mazenganya, P; Billings, B K. (2016): Topographic and morphometric features of the nutrient foramina of the fibula in the South African mixed-ancestry population group and their surgical relevance. *Eur J Anat* 20: S. 329-336.
64. Mazenganya, P; Fasemore, M D. (2015): Morphometric studies of the nutrient foramen in lower limb long bones of adult black and white South Africans. *Eur J Anat* 19: S. 155-163.
65. McMillan, T E.; Johnstone, A J. (2017): Technical considerations to avoid delayed and non-union. *Injury* 48 Suppl 1: S64-S68.
66. Meinberg, E G.; Agel, J; Roberts, C S.; Karam, M D.; Kellam, J F. (2018): Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018. *J Orthop Trauma* 32 Suppl 1: S1-S170.
67. Meisinger, C; Wildner, M; Stieber, J; Heier, M; Sangha, O; Döring, A (2002): Epidemiologie der Extremitätenfrakturen. *Orthopade* 31: S. 92-99.
68. Menck, J; Bertram, C; Grüber, J; Lierse, W (1992a): Entwicklung eines Tibiamarknagels auf der Basis anatomischer Untersuchungen der intraossären Gefäße. *Unfallchirurgie* 18: S. 321-324.
69. Menck, J; Bertram, C; Lierse, W; Wolter, D (1992b): Das arterielle Versorgungsprinzip der Tibia und seine praktischen Konsequenzen. *Langenbecks Arch Chir* 377: S. 229-234.
70. Mohan, K; Devaraj, B; Ramanathan, S; Rethinasamy, M (2017): Morphometric Study of Nutrient Foramen in the Long Bones of Lower Limb. *Int J Anat Res* 5: S. 3943-3948.
71. Müller-Mai, C; Frank, M (2015): Klassifikationen in der Unfallchirurgie. In: Müller-Mai, C und Ekkernkamp, A (Hg.): *Frakturen auf einen Blick*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: S. 1-16.
72. Murlimanju, B V.; Prashanth, K U.; Prabhu, L V.; Saralaya, V V.; Pai, M M.; Rai, R (2011): Morphological and topographical anatomy of nutrient foramina in human upper limb long bones and their surgical importance. *Rom J Morphol Embryol* 52: S. 859-862.
73. Mysorekar, V R. (1967): Diaphysial nutrient foramina in human long bones. *J Anat* 101: S. 813-822.
74. Nagel, A (1993): The clinical significance of the nutrient artery. *Orthop Rev* 22: S. 557-561.
75. Neumair, M; Biberthaler, P (2017): Hypertrophe Pseudarthrose. In: van Griensven, M und Delhey, P (Hg.): *Knochendefekte und Pseudarthrosen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (SpringerReference Medizin): S. 77-100.
76. Orlor, R; Locher, S; Lottenbach, M; Heini, P; Ganz, R (2002): Retrospektive Analyse der Heilungsstörungen nach aufgebohrter und unaufgebohrter Nagelung von Femurschaftfrakturen. *Unfallchirurg* 105: S. 431-436.

77. Paar, O; mon O'Dey, D; Magin, M N.; Prescher, A (2000): Beeinträchtigung der Arteria nutricia tibiae durch die aufgebohrte und die unaufgebohrte Marknagelung. Untersuchung zur Gefassarchitektur der humanen Tibiamarkhöhle. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 138: S. 79-84.
78. Parmar, A; Maheria, P; Shah, K (2019): Study of Nutrient Foramina in Human Typical Long Bones of Lower Limb. *National Journal of Clinical Anatomy* 08: S. 77-81.
79. Peng, Y; Hao, M; Chen, H; Zhang, L; Tang, P (2013): Did you notice the tibial nutrient artery when applying external fixation? *Int Orthop* 37: S. 2089-2090.
80. Pereira, G Augusta; Campos Lopes, P; Santos, A Maria; Silveira, F (2011): Nutrient Foramina in the Upper and Lower Limb Long Bones: Morphometric Study in Bones of Southern Brazilian Adults. *International Journal of Morphology* 29: S. 514-520.
81. Pfister, U (2010): Marknagelung nach Aufbohrung. *Orthopade* 39: S. 171-181.
82. Prokop, M (2006): Bildbearbeitung und Darstellungstechniken. In: Prokop, M, Galanski, M, Schaefer-Prokop, C und van der Molen, AJ. (Hg.): *Ganzkörper-Computertomographie: Spiral- und Multislice-CT*. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage: Georg Thieme Verlag: S. 51-87, zuletzt geprüft am 13.06.2020.
83. Rand, J A.; Nan An, K; Chao, E Y.; Kelly, P J. (1981): A comparison of the effect of open intramedullary nailing and compression-plate fixation on fracture-site blood flow and fracture union. *J Bone Joint Surg Am* 63: S. 427-442.
84. Rhinelander, F W. (1974): Tibial blood supply in relation to fracture healing. *Clin Orthop Relat Res*: S. 34-81.
85. Riemer, A (2017): Bildnachbearbeitung CTA Becken-Bein. In: Riemer, A (Hg.): *Computertomografie für MTRA/RT*. 1. Auflage: Georg Thieme Verlag: S. 270-271, zuletzt geprüft am 15.06.2020.
86. Roul, B; Goyal, M (2015): A Study Of Nutrient Foramen In Long Bones Of Inferior Extremity In Human Being Issue 4, 945-948. *Int J Adv Res* 3: S. 945-948.
87. Rubin, C T.; Lanyon, L E. (1987): Osteoregulatory nature of mechanical stimuli: function as a determinant for adaptive remodeling in bone. *J. Orthop. Res.* 5: S. 300-310.
88. Santolini, E; Goumenos, S D.; Giannoudi, M; Sanguineti, F; Stella, M; Giannoudis, P V. (2014): Femoral and tibial blood supply: A trigger for non-union? *Injury* 45: S. 1665-1673.
89. Sartoris, D J.; Resnick, D; Bielecki, D; Andre, M; Gershuni, D; Meyers, M (1986): A technique for multiplanar reformation and three-dimensional analysis of computed tomographic data: application to adult hip disease. *Can Assoc Radiol J* 37: S. 69-72.
90. Sartoris, D J.; Resnick, D; Bielecki, D; Gershuni, D; Meyers, M (1988): Computed tomography with multiplanar reformation and three-dimensional image reconstruction in the preoperative evaluation of adult hip disease. *Int Orthop* 12: S. 1-8.
91. Schiessel, A; Zweymüller, K (2004): The nutrient artery canal of the femur: a radiological study in patients with primary total hip replacement. *Skeletal Radiol* 33: S. 142-149.

92. Schubert, E C.; van Griensven, M (2017): Blutversorgung des Knochens. In: van Griensven, M und Delhey, P (Hg.): Knochendefekte und Pseudarthrosen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (SpringerReference Medizin): S. 19-29.
93. Sendemir, E; Cimen, A (1991): Nutrient foramina in the shafts of lower limb long bones: situation and number. *Surg Radiol Anat* 13: S. 105-108.
94. Seubert, B; van der Molen, A J.; Balmayor, E R. (2017): Das Organ Knochen. Histologie und Zellmechanismen. In: van Griensven, M und Delhey, P (Hg.): Knochendefekte und Pseudarthrosen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (SpringerReference Medizin): S. 3-10.
95. Sharma, M; Prashar, R; Sharma, T; Wadhwa, A; Kaur, J (2015): Morphological Variations of Nutrient Foramina in Lower Limb Long Bones. *International Journal of Medical and Dental Sciences* 4: S. 802.
96. Simon, M H.; Grünwald, L; Schenke, M; Dickschas, J; Strecker, W (2020): Corrective osteotomies of femur and tibia: which factors influence bone healing? *Arch Orthop Trauma Surg* 140: S. 303-311.
97. Standring, S (Hg.) (2016): *Gray's anatomy. The anatomical basis of clinical practice* (41. Aufl.). New York: Elsevier Limited.
98. Steinhausen, E; Glombitza, M; Böhm, H-J; Hax, P-M; Rixen, D (2013): Pseudarthrosen. Von der Diagnose bis zur Ausheilung. *Unfallchirurg* 116: 633-47; quiz 648-9.
99. Tejaswi, H L.; Shetty, K; Dakshayani, K R. (2016): Anatomic Study of Nutrient Foramina in the Human Tibiae and Their Clinical Importance. *Int J Recent Trends Sci Technol* 9: S. 334-336.
100. Tomlinson, R E.; Silva, M J. (2013): Skeletal Blood Flow in Bone Repair and Maintenance. *Bone Res* 1: S. 311-322.
101. Trueta, J (1953): The influence of the blood supply in controlling bone growth. *Bull Hosp Joint Dis* 14: S. 147-157.
102. Trueta, J (1974): Blood supply and the rate of healing of tibial fractures. *Clin Orthop Relat Res*: S. 11-26.
103. Tzioupis, C; Giannoudis, P V. (2007): Prevalence of long-bone non-unions. *Injury* 38: S3-S9.
104. Udaya, K P.; Janardhan, R M.; Sirisha, V; Kalpana, T (2017): A STUDY OF THE NUTRIENT FORAMINA IN DRY HUMAN TIBIA BONES OF TELANGANA REGION. *Int J Anat Res* 5: S. 4152-4157.
105. Vadhel, C R.; Kulkarni, M; Gandotra, A R. (2015): Anatomy of nutrient foramen of tibia – a study from Gujarat region. *Indian Journal of Clinical Anatomy and Physiology* 2: S. 6-10.
106. van Basten Batenburg, M; Houben, I B.; Blokhuis, T J. (2019): The Non-Union Scoring System: an interobserver reliability study. *Eur J Trauma Emerg Surg* 45: S. 13-19.

107. Vinay, G; Mangale Gowri, S R. (2017): Anatomical study of the nutrient foramen of lower limb long bones in South Indian population. *Ind J Clin Anat Phys* 4: S. 222-224.
108. Wennergren, D (Hg.) (2019): *Studies of Tibial Fractures Using the Swedish Fracture Register*. University of Gothenburg. Sweden.
109. Wennergren, D; Bergdahl, C; Ekelund, J; Juto, H; Sundfeldt, M; Möller, M (2018): Epidemiology and incidence of tibia fractures in the Swedish Fracture Register. *Injury* 49: S. 2068-2074.
110. Wu, R G.; Tang, B H.; Li, L C.; He, Y Q.; Huang, D C.; Huang, H; Wang, Z C. (2010): [Measurement of anatomical relationships of facial nerve canal related to middle ear and mastoid surgery on multi-slice computed tomography-multiplanar reformation images]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi* 90: S. 1551-1555.
111. Zimmermann, G (2017): Verzögerte Knochenheilung. In: van Griensven, M und Delhey, P (Hg.): *Knochendefekte und Pseudarthrosen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (SpringerReference Medizin): S. 63-76.
112. Zimmermann, G; Wagner, C; Schmeckenbecher, K; Wentzensen, A; Moghaddam, A (2009): Treatment of tibial shaft non-unions: bone morphogenetic proteins versus autologous bone graft. *Injury* 40: S50-S53.
113. Zura, R; Xiong, Z; Einhorn, T; Watson, J Tracy; Ostrum, R F.; Prayson, M J.; Della Rocca, G J.; Mehta, S; McKinley, T; Wang, Z; Steen, R Grant (2016): Epidemiology of Fracture Nonunion in 18 Human Bones. *JAMA Surg* 151: e162775.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vor- und Nachteile der unaufgebohrten Marknagelung.....	19
Tab. 2: Alters- und Geschlechtsverteilung der Patienten.	42
Tab. 3: Anzahl der Foramina rechts (Vergleich Männer/Frauen).	43
Tab. 4: Anzahl der Foramina links (Vergleich Männer/Frauen).	43
Tab. 5: Anzahl der Foramina links (Vergleich rechts/links).	44
Tab. 6: Übereinstimmungen der Foramina nach Seitenlokalisierung.....	44
Tab. 7: Lokalisation der Foramina externa rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).....	45
Tab. 8: Lokalisation der Foramina externa linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).	45
Tab. 9: Lokalisation der Foramina externa (Vergleich rechts/links).	46
Tab. 10: Übereinstimmungen der Foramina externa nach Seitenlokalisierung.	46
Tab. 11: Lokalisation der Foramina interna rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).	47
Tab. 12: Lokalisation der Foramina interna linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).	47
Tab. 13: Anzahl der Foramina interna (Vergleich rechts/links).....	47
Tab. 14: Übereinstimmungen der Foramina interna nach Seitenlokalisierung.	48
Tab. 15: Verschiedene anatomische Parameter rechte Tibia (Vergleich Männer/Frauen).	49
Tab. 16: Verschiedene anatomische Parameter linke Tibia (Vergleich Männer/Frauen).....	50
Tab. 17: Verschiedene anatomische Parameter linke Tibia (Vergleich rechts/links).....	51
Tab. 18: Korrelation zwischen der Tibialänge (re.) und anatomischen Parametern.	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Äußeres Foramen der A. nutricia an der Tibia (Pfeil).	8
Abb. 2: Inzidenz von tibialen Schaftfrakturen bei Frauen und Männern.....	10
Abb. 3: Inzidenz der Tibia-Frakturen bei Frauen und Männern im Vergleich.....	11
Abb. 4: Segment-Einteilung der Tibia.....	13
Abb. 5: Kodierung der anatomischen Lokalisation.	13
Abb. 6: Schweregrad bzw. Ausmaß der Gelenkbeteiligung proximalen und distalen Frakturen. ...	14
Abb. 7: Klassifikation der diaphysären Tibiafrakturen.	15
Abb. 8: Alpha-nummerische Struktur der AO-Klassifikation für lange Röhrenknochen.....	16
Abb. 9: Schematische Darstellung der Tibia Marknagelung.	18
Abb. 10: Marknägel; verschiedene Designs.	20
Abb. 11: Avitale Pseudarthrose.....	21
Abb. 12: Einteilung der Pseudarthrosen nach dem biologischen Verhalten.	22
Abb. 13: Aufbau von langen Röhrenknochen.	28
Abb. 14: Verlauf der A. nutricia in der Tibia.....	30
Abb. 15: Linke Tibia mit Fibula von posterior.....	31
Abb. 16: Epiphysale Blutversorgung.	32
Abb. 17: Flussdiagramm der Einschluss- und Ausschluss-Kriterien.	37
Abb. 18: Kanal der A. nutricia tibiae.....	39
Abb. 19: Anguläre Position der Foramina.	40
Abb. 20: Altersverteilung in drei Gruppen.	42
Abb. 21: Grafische Darstellung der wichtigsten Mess-Strecken bei Männern und Frauen (Tibia rechts).	52
Abb. 22: Grafische Darstellung der AF- und IF-Distanz bei Männern und Frauen (Tibia rechts; Angabe der 10. und 90. Perzentile).....	53

Abb. 23: Abhängigkeit der Distanz des äußeren Foramens von der Tibialänge.....	55
Abb. 24: Abhängigkeit der Distanz des inneren Foramens von der Tibialänge.....	55
Abb. 25: Abhängigkeit der NAC-Länge von der Tibialänge.	56
Abb. 26: Spannweite des FI (Foraminal-Index) bei langen Röhrenknochen.	81

Veröffentlichungen

Teile der vorliegenden Dissertationsschrift wurden bereits veröffentlicht.

Publikation:

Almansour, H; Armoutsis, E; Reumann, M K.; Nikolaou, K; Springer, F (2020a):
The Anatomy of the Tibial Nutrient Artery Canal-An Investigation of 106 Patients Using
Multi-Detector Computed Tomography. J Clin Med 9

Schriftliche Erklärung (eid. Versicherung)

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie unter Betreuung von Prof. Dr. med. Fabian Springer durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Prof. Dr. med. Fabian Springer und mir.

Die Erhebung und Auswertung der Daten wurden von mir durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte durch mich.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Kornwestheim, 30.01.2023

Eleftherios Armoutsis

Danksagung

Mein Dank gilt meiner Frau Ana, die mir stets helfend zur Seite stand und im Studium den Rücken freihielt.

Für die unterstützende und geduldige Betreuung und auch die zugängliche Art, danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Fabian Springer.