

Aus der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie der
Universitätsmedizin Rostock

Direktor: Prof. Dr. med. Sven Märdian

**Ergebnisse einer prospektiven longitudinalen Studie zu
Komplikationen und funktionellem Outcome nach
osteoporotischer Fraktur des oberen Sprunggelenks**

Inauguraldissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin
der Universitätsmedizin Rostock

vorgelegt von
Marie Wölper
geboren am 30.10.1998 in Köln

Rostock 2025

Dekan: Prof. Dr. med. Bernd J. Krause

Gutachter

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Thomas Mittlmeier, UMR
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Dagmar-Christiane Fischer, UMR
3. Gutachter: Prof. Dr. med. Sebastian Baumbach, LMU München

Datum der Einreichung: 20.02.2025

Datum der Verteidigung: 24.02.2026

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

- 1.1 Osteoporose als Risikofaktor für Frakturen beim älteren Menschen
- 1.2 Grundlagen des Knochenstoffwechsels
 - 1.2.1 Zelluläre Mechanismen des Knochenumbaus
 - 1.2.2 Der Knochen als endokrin aktives Organ
 - 1.2.3 Endokrine Regulation des Calcium-Phosphat-Stoffwechsels
- 1.3 Epidemiologie und Ätiologie der oberen Sprunggelenksfraktur
- 1.4 Anatomie und Biomechanik des oberen Sprunggelenks
- 1.5 Einteilung der oberen Sprunggelenksfraktur
- 1.6 Begleitverletzungen der oberen Sprunggelenksfraktur
- 1.7 Diagnostische Standards in der Behandlung der oberen Sprunggelenksfraktur
- 1.8 Therapie der oberen Sprunggelenksfraktur
- 1.9 Funktionelles Outcome nach Behandlung einer oberen Sprunggelenksfraktur

2 Ziel der Arbeit

3 Patienten und Methoden

- 3.1 Studienablauf
- 3.2 Anamnese und klinische Untersuchung
- 3.3 Quantitative Bestimmung von Markern des Knochenstoffwechsels in Serum bzw. Plasma
- 3.4 Bestimmung der Knochendichte durch Pulsechographie
- 3.5 Bestimmung der Griffkraft
- 3.6 Erhebung des EFAS-Scores
- 3.7 Beurteilung der Mobilität mit dem Timed "Up and Go"-Test
- 3.8 Dynamische Messung der Bodenreaktionskraft
- 3.9 Statistische Auswertung

4 Ergebnisse

- 4.1 Anthropometrische und klinische Charakteristika der Studienteilnehmer
 - 4.1.1 Frakturtyp, Behandlung und Komplikationen
- 4.2 Ergebnisse der präoperativen MRT-Diagnostik
- 4.3 Ergebnisse der klinischen Untersuchung des oberen Sprunggelenks
- 4.4 Griffkraft-Messung als Indikator für allgemeine körperliche Kraft
- 4.5 Ergebnisse klinischer Scores und Funktionstests zur Beurteilung von Mobilität und Funktionseinschränkungen des Sprunggelenks
 - 4.5.1 Der EFAS-Score
 - 4.5.2 Beurteilung der Mobilität durch den Timed “Up and Go“-Test
 - 4.5.3 Der Factor of Imbalance beim Gehen auf verschiedenen Untergründen
- 4.6 Charakterisierung der Knochenqualität
 - 4.6.1 Ergebnisse der Knochendichtemessung mit Hilfe der Pulsechographie
 - 4.6.2 Ergebnisse der quantitativen Bestimmung von Markern des Knochenstoffwechsels

5 Diskussion

- 5.1 Die OSG-Fraktur als Fragilitätsfraktur des älteren Menschen
- 5.2 Outcome nach OSG-Fraktur in Relation zur präoperativen Bildgebung
- 5.3 Grenzen der vorliegenden Arbeit
- 5.4 Fazit und Ausblick

6 Zusammenfassung

7 Thesen

8 Anhang

- 8.1 EFAS-Score

9 Danksagung

10 Curriculum Vitae

11 Selbstständigkeitserklärung

12 Literaturverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ant.	Anterior / anterieus
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
BAP	Knochenspezifische Alkalische Phosphatase
BIA	Bioelektrische Impedanzanalyse
BMI	Body Mass Index
CT	Computertomografie
BDI	Bone Density Index
DVO	Dachverband Osteologie
DXA	Dual-X-Ray-Absorptiometry
EFAS	European Foot and Ankle Society
ELISA	Enzyme-Linked Immunosorbent Assay
FGF-23	Fibroblast Growth Factor-23
FOIB	Factor of Imbalance
HGS	Hand Grip Strength
Lig.	Ligamentum
MRT	Magnetresonanztomografie
N.	Nervus
OSG	Oberes Sprunggelenk
PROM	Patient Reported Outcome Measures
PTH	Parathormon
TRAP5b	Tartrat-resistente saure Phosphatase 5b
TUG	Timed "Up and Go"-Test

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Darstellung des Knochenumbaus
- Abb. 2: Endokriner Regelkreis zwischen Calcitriol, FGF-23 und Parathormon
- Abb. 3 A, B: Knöchernes rechtes Sprunggelenk
- Abb. 4: Ablauf und Inhalt der Studienuntersuchungen
- Abb. 5: Loadsol®-Einlegesohlen mit geöffnetem Datentransmitter links
- Abb. 6 A-C: Strecke der Ganganalyse im Außengelände der Klinik
- Abb. 7: Übersicht zur Anzahl der prinzipiell für die Studie geeigneten und letztlich eingeschlossenen Patienten
- Abb. 8 A-C: Darstellung von BMI, relativer fettfreier Körpermasse und relativer Speicherfettmasse in Relation zum Verlauf von t_0 bis t_3
- Abb. 9: präoperative Beurteilung des Bandapparates mittels MRT
- Abb. 10: Darstellung der Z-Scores der Griffkraft relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3
- Abb. 11 A, B: Darstellung des EFAS-Scores und EFAS-Sport-Score relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3
- Abb. 12 A-C: Darstellung von Gangasymmetrien auf unterschiedlichen Teststrecken relativ zum Verlauf von t_1 bis t_3
- Abb. 13: Darstellung der pulsechographisch ermittelten Knochendichte der nicht frakturierten Seite relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3
- Abb. 14 A, B: Darstellung der Konzentrationen von BAP und TRAP5b relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3
- Abb. 15 A-C: Darstellung der Konzentrationen von Sclerostin, iFGF23 und α -Klotho relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Intervalle zwischen Fraktur und Nachuntersuchungen

Tab. 2: Anthropometrische Charakteristika der Probanden

Tab. 3: Häufigkeit der Frakturtypen nach AO-Klassifikation in den Studien-
gruppen

Tab. 4: ROM des OSG und Knöchelumfänge

Tab. 5: Korrelation des EFAS-Score mit der Griffkraft

1 Einleitung

1.1 Osteoporose als Risikofaktor für Frakturen beim älteren Menschen

Die „Consensus development conference on diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis“ definiert Osteoporose als eine systemische Skeletterkrankung, die durch eine verminderte Knochenmasse und mikroarchitektonische Veränderungen des Knochens gekennzeichnet ist. Aus diesen Veränderungen resultiert ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Frakturen (Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis 1993). Im Jahr 2019 waren in Deutschland schätzungsweise 22,6 % der Frauen und 6,6% der Männer über 50 Jahren von Osteoporose betroffen (Kanis et al. 2021).

Die Dysbalance von Knochenaufbau und Knochenabbau ist ursächlich für eine Osteoporose. Sowohl zunehmendes Alter als auch die Abnahme des Östrogenspiegels in der Menopause steigern das Risiko, an einer Osteoporose zu erkranken. Senile und postmenopausale Osteoporose werden als primäre Osteoporose bezeichnet. Sofern es infolge anderer Krankheiten oder durch die Einnahme von Medikamenten zu einer reduzierten Knochenmasse kommt, spricht man von einer sekundären Osteoporose (Barnsley et al. 2021).

Die Diagnose der Osteoporose beruht auf klinischer Anamnese, körperlicher Untersuchung, klinischen Tests und den Ergebnissen der Knochendichtemessung. Diese wird standardmäßig als Dual-X-Ray-Absorptiometry (DXA) durchgeführt. Laut WHO-Definition liegt eine Osteoporose vor, wenn der Bone mineral index (BMD) der DXA-Messung an der Lendenwirbelsäule und/oder am proximalen Femur mehr als 2,5 Standardabweichungen unter dem statistischen Mittelwert eines jungen gesunden Menschen liegt (Kanis JA on behalf of the World Health Organization Scientific Group 2007). Weitere Messtechniken wie die quantitative Computertomografie (QCT) und quantitative Ultraschallverfahren (QUS) können bei unklaren DXA-Befunden sowie als Vortest bei Gruppen von Hochrisikopatienten, sofern erschwerte Bedingungen für eine DXA bestehen erwogen werden. (DVO e.V. 2023).

1.2 Grundlagen des Knochenstoffwechsels

1.2.1 Zelluläre Mechanismen des Knochenumbaus

Knochen wird als dynamisches Gewebe permanent umgebaut (Remodeling). Daran sind Zellen der mesenchymalen (Osteoblasten) sowie der hämatopoetischen Zellreihe (Osteoklasten) beteiligt, die für den Aufbau neuer bzw. den Abbau alter Knochenmatrix sorgen. Das Remodeling kann in Activation, Resorption, Reversal, Formation und Termination (Abbildung 1) eingeteilt werden (Katsimbri 2017; Raggatt und Partridge 2010).

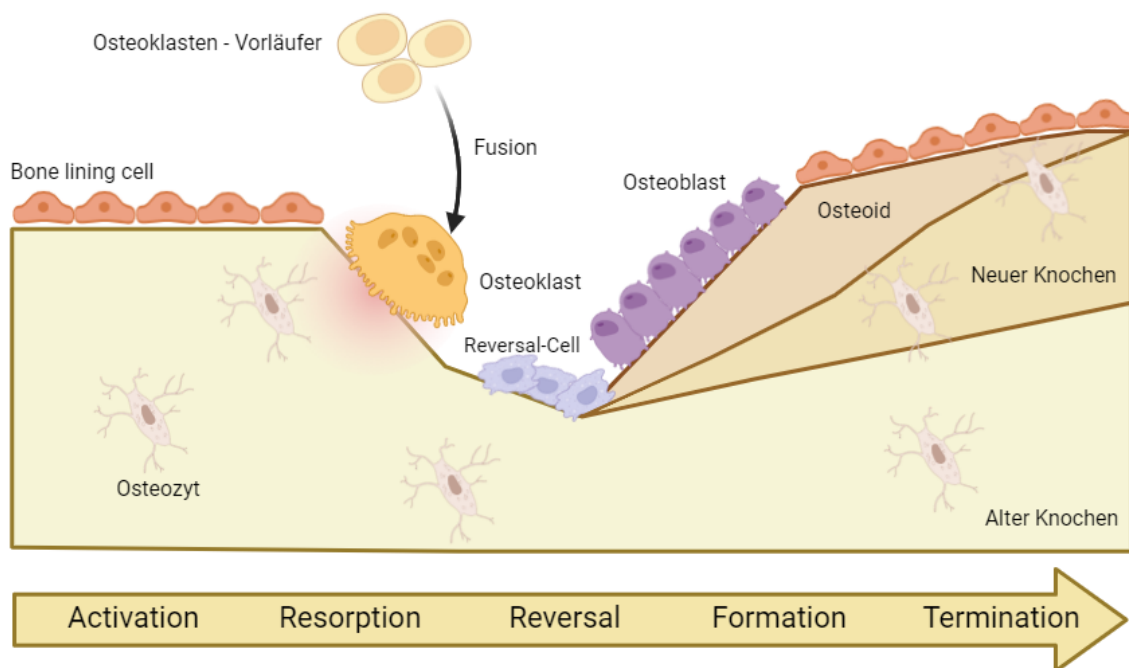


Abb. 1: Darstellung des Knochenumbaus

Osteoklasten-Vorläufer werden aktiviert und fusionieren zu mehrkernigen Osteoklasten. Diese resorbieren den Knochen. Die Resorptionslakunen werden von mononukleären Zellen (u.a. Makrophagen, Prä-Osteoblasten) besiedelt. Osteoblasten bilden neues Osteoid, welches in der Folge mineralisiert wird. Am Ende dieses Prozesses geht der Knochen in eine Ruhephase über. (Modifiziert nach Siddiqui und Partridge (2016), Abbildung erstellt mit BioRender)

Durch einen auslösenden mechanischen oder hormonellen Reiz wird die Rekrutierung und Aktivierung von Osteoklasten-Vorläufern aus dem Blutstrom induziert (Raggatt und Partridge 2010). Die Proliferation und Differenzierung der Osteoklasten-Vorläufer zu multinukleären Osteoklasten wird durch M-CSF stimuliert. Weiterhin ist die durch RANK und RANK-Liganden vermittelte Interaktion von Osteoklasten (RANK) und Osteoblasten (RANK-L) erforderlich,

wobei die Wirkung von RANK-L auf die Osteoklasten durch das von den Osteoblasten gebildete Osteoprotegerin (OPG) blockiert werden kann (Suda et al. 1999). Aktivierte Osteoklasten lagern sich der Knochenoberfläche an und resorbieren die Knochenmatrix durch Freisetzung von Protonen und denaturierenden Enzymen (Boyce et al. 2012). Dabei sezernieren sie u.a. TRAP5b, ein Metalloenzym, dessen Hauptfunktion im Abbau von Phosphoproteinen der Knochenmatrix mit nachfolgend erleichtertem Zugang für spezifische Proteinasen besteht. Zudem fördert es durch die Dephosphorylierung von Osteopontin die Osteoklasten-Migration. Seine Aktivität korreliert stark mit Anzahl und Volumen der Osteoklasten, daher wird die TRAP5b-Aktivität als Marker für die Osteoklastenfunktion eingesetzt (Schini et al. 2023; Oddie et al. 2000). In den bei der Resorption entstandenen Resorptionslakunen wird der Knochen demineralisiert und die organische Matrix freigelegt. Danach gehen die Osteoklasten, u. a. durch den beim Knochenabbau entstandenen hohen extrazellulären Calciumspiegel induziert, in die Apoptose (Boyce et al. 2012).

Der Übergang von Knochenabbau zu Knochenneubildung bedarf der Kommunikation (*coupling*) zwischen Osteoklasten und Osteoblasten. Zunehmende Bedeutung in diesem Prozess wird einer sog. Reversal-Zelle zugeschrieben. Diese trägt zunächst u.a. durch den Abbau von Kollagen in den Resorptionslakunen zum Knochenabbau bei, differenziert im Verlauf und ist dann am Knochenaufbau beteiligt (Delaisse 2014). Osteoblasten sezernieren die primär aus Typ 1 Kollagen bestehende Knochenmatrix (Osteoid) in die Lakunen und sorgen, sofern ausreichend hohe extrazelluläre Konzentrationen von ionisiertem Calcium (Ca^{2+}) und anorganischem Phosphat (P_i) vorherrschen, für die Mineralisierung durch Hydroxylapatitkristalle $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ (Murshed 2018). In der Membran der Osteoblasten ist eine knochenspezifische alkalische Phosphatase (bone specific alkaline phosphatase; BAP) verankert, die für die Hydrolyse von Pyrophosphat zu Phosphat und damit für die Mineralisierung der Matrix benötigt wird. Die Aktivität von BAP spiegelt die Mineralisierungsphase der Knochenbildung wider und dient als Marker für die Knochenbildung (Schini et al. 2023). Ein Teil der Osteoblasten wird vollständig von der neu gebildeten Knochenmatrix umhüllt und differenziert sich zu Osteozyten, ein anderer Teil ummantelt die neu gebildete Knochenoberfläche als bone lining cells, der verbliebene Teil der Osteoblasten geht in die Apoptose (Raggatt und Partridge 2010).

Osteozyten regulieren die Knochenmineralisierung und kommunizieren über dendritische Verbindungen miteinander, welche als Mechanosensoren dienen. Unter anderem synthetisieren sie FGF-23, welches über die endokrine Regulation des Calcium-Phosphatstoffwechsels Einfluss auf die Knochenmineralisierung hat (s.u.) und das Glykoprotein Sclerostin, welches vom SOST-Gen codiert wird und ein negativer Regulator des Wnt/ β -Catenin-Signalwegs ist. Dieser Signalweg spielt über die Induktion der Transkription von am Knochenaufbau beteiligten Genen eine entscheidende Rolle bei der Anpassung des Knochens an mechanische Belastung (Bonewald 2011). Die Aktivität von Sclerostin kann als Marker im Blut gemessen werden, dabei korreliert eine erhöhte Sclerostin-Expression mit einer im Alter abnehmenden Knochenmasse. In der Osteoporosetherapie dient Sclerostin als Zielprotein für den monoklonalen Antikörper Romosozumab (Omran et al. 2022).

1.2.2 Der Knochen als endokrin aktives Organ

Für die Knochenmineralisierung ist ein enges Zusammenspiel zwischen dem Knochenstoffwechsel und dem Calcium-Phosphat-Stoffwechsel essentiell. Dieser wird über die Wechselwirkung von Parathormon, Calcitriol ($1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$) und FGF-23 reguliert. Der Knochen ist dabei nicht nur Zielorgan, sondern greift als endokrines Organ aktiv in die Regulation der Calcium-Phosphat-Homöostase ein (Goretti Penido und Alon 2012).

FGF-23 ist ein aus 251 Aminosäuren bestehendes Protein und wird überwiegend von Osteozyten exprimiert und sezerniert. Es gehört zusammen mit FGF-15 (Maus)/19 und FGF-21 zu den endokrin wirksamen FGFs (Martin et al. 2012; Liu und Quarles 2007). Die gewebsspezifische Wirkung von FGF-23 erfolgt durch die Bindung an einen Komplex aus FGF-Rezeptor und dem Transmembranprotein α -Klotho. Dieser Co-Faktor wird in Knochen, Niere, Nebenschilddrüse und Gehirn exprimiert, sodass FGF-23 in diesen Geweben seine physiologische Wirkung entfalten kann (Martin et al. 2012; Bian et al. 2014; Razzaque 2009; Urakawa et al. 2006). Diese besteht insbesondere in der Hemmung der renalen Phosphatreabsorption sowie der systemischen $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ -Suppression (Martin et al. 2012).

1.2.3 Endokrine Regulation des Calcium-Phosphat-Stoffwechsels

Calcium und Phosphat werden über die Nahrung aufgenommen, enteral resorbiert, im Knochen gespeichert und über die Niere ausgeschieden (Abbildung 2). $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ stimuliert die enterale Calcium- und

Phosphatresorption. PTH, welches in der Nebenschilddrüse als Reaktion auf einen verminderten Serumcalciumspiegel ausgeschüttet wird, hat dabei einen indirekt fördernden Effekt, da es die Synthese von aktivem $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ über die renale Expression der $1\text{-}\alpha\text{-Hydroxylase}$ stimuliert. Dieses hemmt in einem negativen Feedback-Mechanismus die PTH-Sekretion. Vermehrte enterale Phosphataufnahme sowie hohe PTH- und $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ -Spiegel stimulieren die Expression von FGF-23 im Knochen, welches wiederum die PTH- und $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ -Expression hemmt. Durch Stimulation der Osteoklasten fördert PTH die Freisetzung des im Verbund mit Phosphat als Hydroxylapatit gespeicherten Calciums aus dem Knochen (Goretti Penido und Alon 2012; Wolf 2012).

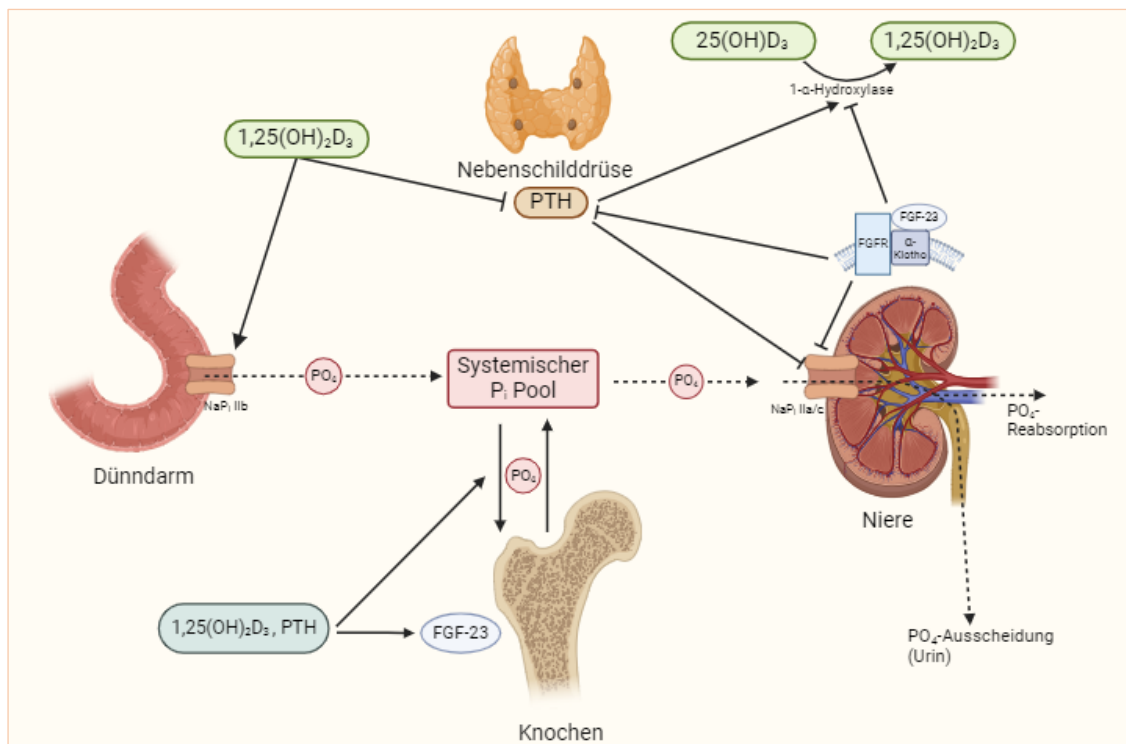


Abb. 2: Endokriner Regelkreis zwischen Calcitriol, FGF-23 und Parathormon

Phosphat wird enteral absorbiert. Seine Serumkonzentration wird durch die Nebenschilddrüsen-Knochen-Nierenachse reguliert. $\rightarrow$ = stimuliert, $\perp$ = hemmt. (Modifiziert nach Goretti Penido und Alon, Abbildung erstellt mit BioRender)

Die Niere ist das zentrale Organ der kurzfristigen Phosphat-Regulation. Die Phosphat-Reabsorption erfolgt über Natrium-Phosphat-Co-Transporter Typ II a/c im proximalen Tubulus. Deren Expression wird durch PTH und FGF-23 gehemmt, sodass vermehrt Phosphat ausgeschieden wird, während $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ über die

Hemmung der PTH-Sekretion die Phosphatausscheidung hemmt. Zudem fördert PTH die Calcium-Reabsorption im distalen Tubulus. (Goretti Penido und Alon 2012; Balani und Perwad 2019)

1.3 Epidemiologie und Ätiologie der oberen Sprunggelenksfraktur

Die Fraktur des OSG gehört zu den häufigsten Fraktur-Typen und macht insgesamt ca. 9% aller Frakturen des Erwachsenen aus (Court-Brown und Caesar 2006). Die jährliche Inzidenz beträgt ca. 169 pro 100.000 Einwohner und 53% der Betroffenen sind weiblich (Elsoe et al. 2018). Während in jüngerem Alter Männer häufiger als Frauen eine OSG-Fraktur erleiden, kehrt sich diese Relation in höherem Alter um (Elsoe et al. 2018; Juto et al. 2018).

Die Mehrzahl aller Sprunggelenksfrakturen wird durch Niedrigrasanztraumata verursacht, welche eher bei älteren Patienten auftreten, während Hochrasanztraumata häufiger bei jüngeren Patienten zu beobachten sind. Suprasyndesmale Frakturen sowie isolierte Frakturen des Malleolus medialis entstehen deutlich häufiger in Folge von Hochrasanztraumata als isolierte Frakturen des Malleolus lateralis oder bi- oder trimalleoläre Typ A- oder B-Frakturen (Court-Brown et al. 1998).

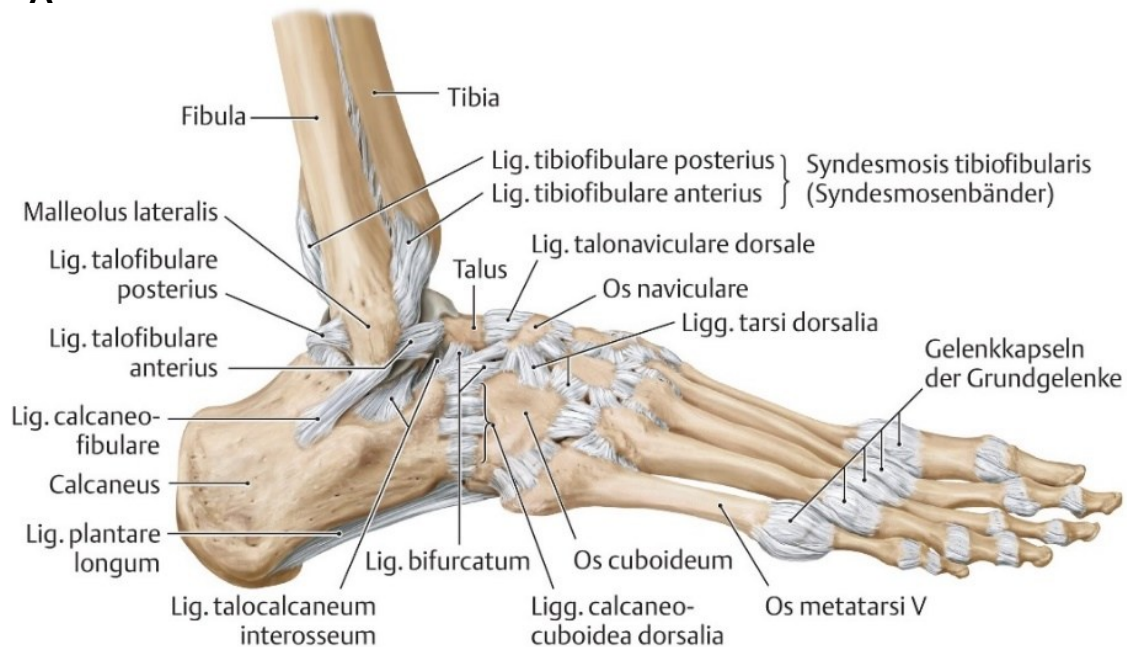
1.4 Anatomie und Biomechanik des oberen Sprunggelenks

Das obere Sprunggelenk (Articulatio talocruralis) stellt die gelenkige Verbindung zwischen den Unterschenkelknochen und dem Talus dar (Abbildung 3). Es handelt sich nur auf den ersten Blick um ein Scharniergelenk, jedoch kommt es bei Dorsalflexion zu einer Außenrotations- und Eversionsbewegung und bei Plantarflexion zu einer Innenrotations- und Supinationsbewegung. Es erreicht einen Bewegungsumfang von 13-33° Dorsalextension und 23-56° Plantarflexion. Das OSG ist beim Gang hohen Kräften bis zum 5,5-fachen des Körpergewichts ausgesetzt (Castro 2002).

Den größten Anteil an der Malleolengabel hat die Tibia mit der Facies articularis inferior. Diese ist konvex gebogen und besitzt eine sagittal verlaufende Leiste, die kongruent zur Führungsrinne des Talus verläuft. Die Facies articularis inferior der Tibia geht fast rechtwinklig in die Gelenkfläche des Malleolus medialis über. Die Fibula bildet den Malleolus lateralis, der den medialen Malleolus um ca. 1 cm nach distal überragt. Die proximale Gelenkfläche des Talus bildet mit der Facies superior und den Facies malleolares den distalen Gelenkkörper. Die Facies superior ist bikonvex gekrümmt und besitzt eine sagittal verlaufende

Führungsrinne zur sicheren Gelenkführung. Die Talusrolle ist ventral etwas breiter als dorsal und limitiert so die Dorsalextension im Sprunggelenk (Rammelt et al. 2004; Müller-Gerbl 2001).

A



B

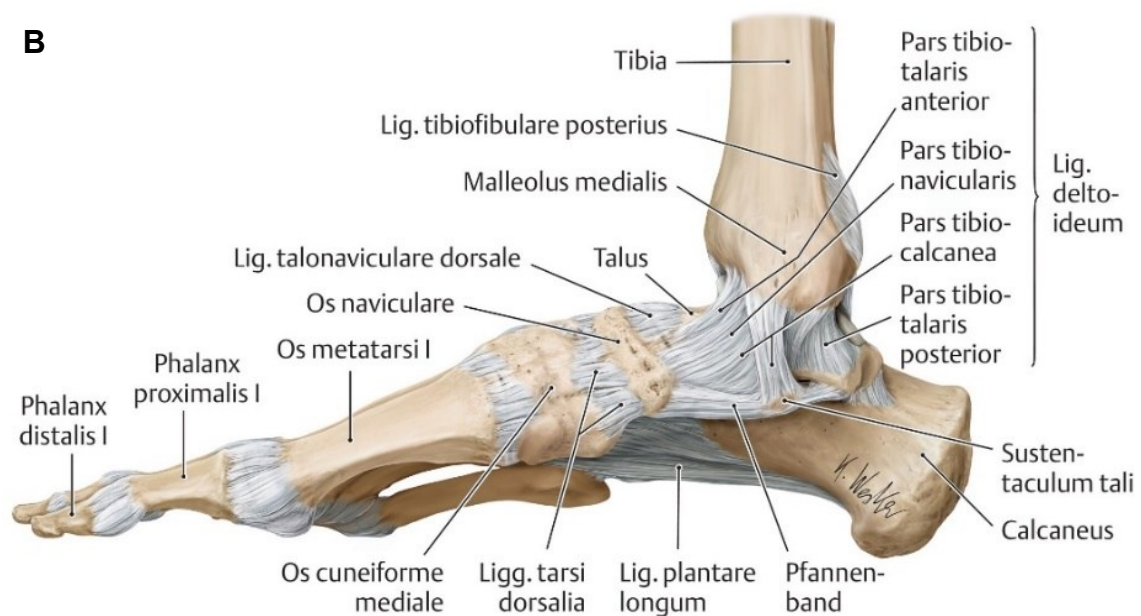


Abb. 3 A, B: Knöchernes rechtes Sprunggelenk

A: Ansicht von lateral; B: Ansicht von medial. (K. Wesker, aus: Prometheus LernAtlas. Thieme, 4. Aufl.)

Die Bandstrukturen des Sprunggelenks können in drei Gruppen unterteilt werden: die tibiofibuläre Syndesmose sowie die medialen bzw. lateralen Kollateralbänder. Die Syndesmose setzt sich aus den Ligg. tibiofibuläre ant. und post. sowie dem Lig. interosseum zusammen. Zusätzlich wird die Syndesmose durch das kaudale Segment der Membrana interossea stabilisiert. Das laterale Kollateralband gliedert sich in die Ligg. talofibuläre ant. und post. und das Lig. calcaneofibuläre. Das Lig. talofibuläre ant. ist das verletzungsanfälligste Band des OSG und ist in Plantarflexion angespannt (Golanó et al. 2010). Das Lig. deltoideum besteht aus drei Bändern, welche stets vorhanden sind (Lig. tibiospring, Lig. tibionaviculare, tiefer Anteil des Lig. tibiotalare post). Weitere, nicht konstant vorkommende Faszikel sind das Lig. tibio calcaneum, Lig. tibiotalare superficiale und der tiefe Anteil des Lig. tibiotalare ant. (Milner und Soames 1998).

1.5 Einteilung der oberen Sprunggelenksfraktur

Zur Einteilung der OSG-Fraktur haben sich verschiedene Systeme etabliert. Die durch die AO (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese) erweiterte Klassifikation nach Danis-Weber erfolgt je nach Lage der Fraktur in Bezug auf die Syndesmose:

Typ A-Fraktur: unterhalb der Syndesmose, Syndesmose intakt

Typ B-Fraktur: auf Höhe der Syndesmose, Syndesmose evtl. rupturiert

Typ C-Fraktur: oberhalb der Syndesmose, Syndesmose rupturiert

Zusätzlich werden Untergruppen je nach Schweregrad gebildet (1: isoliert, 2: mit Beteiligung des Malleolus medialis, 3: mit Beteiligung des hinteren Kantenfragments bzw. bei Typ C-Fraktur: einfach, multifragmentär, mit hoher Fibulafraktur) (AO/OTA 2018).

1.6 Begleitverletzungen der oberen Sprunggelenksfraktur

In Rahmen einer OSG-Fraktur können ligamentäre und chondrale Begleitverletzungen auftreten. Bei fast 80% der Frakturen lassen sich arthroskopisch Knorpelläsionen nachweisen. Dabei ist häufiger der Talus als die distale Tibia und Fibula betroffen. Die Häufigkeit und der Schweregrad der Läsion steigt dabei von Typ B- zu Typ C-Frakturen sowie innerhalb der Subgruppen.

Die korrekte Beurteilung ligamentärer Läsionen gestaltet sich schwierig und Inzidenzen schwanken je nach angewandter Methode. Arthroskopisch finden sich in ca. 40% Hinweise auf eine (Partial-) Ruptur des Deltabandes und bei ca. 66% der Fälle Hinweise für eine Ruptur des Lig. tibiofibulare ant., wobei das Rupturrisiko mit der Höhe der Fibulafraktur steigt. Eine Ruptur des Lig. talofibulare ant. tritt in ca. 45% der Fälle auf und ist häufiger bei Typ B- als bei Typ C-Frakturen vorzufinden (Hintermann et al. 2000).

Zusätzlich weist das OSG aufgrund seiner anatomischen Lage ein besonderes Risiko für Weichteilkomplikationen auf. Besonders ältere Menschen haben durch die oftmals dünne, atrophe Haut, die schlechte Durchblutung, sowie aufgrund von Begleiterkrankungen (Diabetes, Varikosis, Stauungsdermatitis) ein erhöhtes Risiko für Hautnekrosen, welche wiederum Sekundärinfektionen nach sich ziehen können (Loubignac 2022). Schwere Weichteilkomplikationen treten häufig im Rahmen offener Frakturen auf (Ovaska et al. 2015).

1.7 Diagnostische Standards in der Behandlung der oberen Sprunggelenksfraktur

Die Diagnose einer OSG-Fraktur beginnt mit der klinischen Untersuchung, wobei auf Fehlstellungen und Weichteilverletzungen zu achten ist. Eine konventionelle Röntgenaufnahme ist in der Regel erforderlich und wird standardmäßig in zwei Ebenen (anterior-posterior als Mortise-View-Aufnahme und lateral-medial) durchgeführt (Shearman et al. 2013; Goost et al. 2014).

Die Computertomografie erlaubt eine detaillierte Darstellung der Fraktur und dient dem Nachweis eines posterioren Kantenfragments, einer Syndesmosenbeteiligung oder auch einer Impressionsfraktur der distalen Tibiagelenkfläche (Rammelt und Boszczyk 2018).

In der Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie wird die Magnetresonanztomografie als fakultative Zusatzuntersuchung zur Beurteilung von Weichteil- und Knorpelschäden empfohlen (Müller 2004). Syndesmosenverletzungen werden durch die Fraktur mit signifikant höherer Sensitivität als durch CT und Röntgen bei gleicher Spezifität und einer mit der Arthroskopie vergleichbaren Genauigkeit erkannt (Chun et al. 2019).

1.8 Therapie der oberen Sprunggelenksfraktur

Die Therapie der OSG-Fraktur umfasst operative und konservative Maßnahmen. Beide Behandlungsmethoden erzielen kurzfristig ähnliche funktionelle Ergebnisse, wobei das chirurgische Vorgehen die primäre Behandlungsstrategie bleibt, um eine bessere Reposition zu erreichen (Javed et al. 2020).

Die konservative Therapie dient insbesondere der Behandlung nicht oder nur gering dislozierter Frakturen und kann mit Sprunggelenksorthesen, Walker oder Vakuumschuhen erfolgen. Diese Hilfsmittel werden über einen Zeitraum von sechs Wochen verwendet und lassen eine schmerzadaptierte Vollbelastung zu. Eine mögliche Komplikation der konservativen Therapie stelle die sekundäre Dislokation dar (Goost et al. 2014).

Ziel der Behandlung ist die Wiederherstellung der anatomischen Kongruenz der tibiotalaren Einheit. Dies kann durch offene Reposition und interne Fixation (ORIF) erfolgen. Die Verwendung einer Syndesmosenstellschraube ist bei instabiler Syndesmose empfohlen (Singh et al. 2014). Das hintere Kantenfragment sollte im Falle von dislozierten posterolateralen oder zweiteilig posteromedialen Fragmenten sowie bei großen triangulären Fragmenten operativ adressiert werden (Rammelt und Bartoníček 2020).

Die dislozierte OSG-Fraktur kann zu erheblichen Weichteilschäden führen. Die Anlage eines Fixateur externe nach Reposition kann als Alternative zur Schienung bis zur operativen Versorgung das Risiko einer erneuten Dislokation sowie das Auftreten von Weichteilkomplikationen reduzieren (Buyukkuscu et al. 2022).

Postoperativ erfolgt eine Teilbelastung für sechs Wochen. Eine frühfunktionelle physiotherapeutische Nachbehandlung ist in der Regel nötig (Goost et al. 2014). Die Entfernung der Syndesmosenstellschraube sollte frühestens nach sechs Wochen erfolgen (Rammelt und Manke 2018).

1.9 Funktionelles Outcome nach Behandlung einer oberen Sprunggelenksfraktur

Wenngleich die Methoden zur Beurteilung des funktionellen Ergebnisses stark variieren, so herrscht doch allgemeiner Konsens darüber, dass Funktionseinschränkungen und eine verminderte körperliche Belastbarkeit den größten Einfluss auf die gesundheitsbezogene Lebensqualität von Patienten mit

chirurgisch behandelter OSG-Fraktur haben (McKeown et al. 2019, Ribeiro de Ávila et al. 2018).

Zur objektiven Beurteilung der Funktion des OSG können neben der klinischen Untersuchung verschiedene Tests durchgeführt werden. Insbesondere die Beurteilung des Gangbildes kann zur Objektivierung des funktionellen Outcomes beitragen. Flexible, mit Sensoren ausgestattete Einlegesohlen ermöglichen es, Gangveränderungen unter verschiedenen Alltagsbedingungen zu erfassen. Daneben geben globale Tests Auskunft über die allgemeine körperliche Leistungsfähigkeit und Mobilität. Der Timed "Up and Go"-Test (TUG) ist ein einfacher Mobilitätstest und erlaubt zudem eine Beurteilung des Sturzrisikos (Podsiadlo und Richardson 1991). Zur Einschätzung der allgemeinen körperlichen Kraft kann eine Handkraftmessung (Hand Grip Strength; HGS) durchgeführt werden (Porto et al. 2019).

Neben den objektivierbaren Kenngrößen des Outcomes sind auch die vom Patienten wahrgenommenen Beschwerden relevant. Zu deren Erfassung stehen eine Vielzahl von Fragebögen (Patient Reported Outcome Measures, PROMs) zur Verfügung. Für die deutsche Sprache ist der Score der European Foot and Ankle Society (EFAS-Score) validiert. Er umfasst die Kategorien Schmerzen und körperliche Funktionseinschränkungen (Richter et al. 2018).

2 Ziel der Arbeit

Parallel zu dem mit dem Alter zunehmenden Osteoporoserisiko steigt auch das Risiko, dass ein Bagatelltrauma zu einer Fraktur führt. Neben der Fraktur als primär knöcherner Verletzung treten Begleitverletzungen der Weichteile und im Falle einer Sprunggelenksfraktur insbesondere der ligamentären und knorpeligen Strukturen recht häufig auf. Während das primäre Therapieziel ist, die Integrität der knöchernen Strukturen wiederherzustellen, werden evtl. vorhandene Weichteilverletzungen durch eine präoperative röntgenbasierte Bildgebung nicht immer identifiziert und/oder nicht primär adressiert. In diesen Fällen steigt das Risiko bleibender Beschwerden und chronischer Instabilität, was zu Mobilitätseinschränkungen und in der Folge zu Stürzen und weiteren Frakturen führen kann. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine Erweiterung der präoperativen Bildgebung durch die MRT und die damit einhergehende Darstellung ligamentärer Strukturen für die Patienten mit einem besseren funktionellen Ergebnis verbunden ist. Diese Hypothese wurde im Rahmen einer prospektiven, nicht randomisierten Studie geprüft.

3 Patienten und Methoden

Zwischen Januar 2019 und Oktober 2021 wurden Patienten, die sich im Alter von mindestens 65 Jahren mit einer OSG-Fraktur in der Abteilung für Unfall-, Hand-, und Wiederherstellungschirurgie der Chirurgischen Klinik und Poliklinik der Universitätsmedizin Rostock vorstellten, zur Teilnahme an dieser longitudinalen Studie (Registriernummer der Ethikkommission A2018-0225) eingeladen. Voraussetzung für die Teilnahme war - neben der Einwilligung des Patienten - zunächst die Erweiterung der präoperativen röntgenbasierten Bildgebung (Röntgen in zwei Ebenen und CT) um ein zusätzliches präoperatives MRT. Ab Juli 2020 wurden auch Patienten, bei denen diese MRT nicht durchgeführt wurde, in die Studie aufgenommen. Patienten, die zwischen Januar und Juli 2020 aufgrund einer Sprunggelenksfraktur behandelt wurden und keine MRT erhalten hatten, wurden ebenfalls zur Teilnahme eingeladen. Dieses Verfahren erlaubte es, der Gruppe der Patienten mit zusätzlicher MRT-Diagnostik (MRT⁺-Gruppe), eine zweite Gruppe, die eine Bildgebung mit CT und konventionellem Röntgen erhalten hatte (MRT⁻-Gruppe), gegenüber zu stellen.

Patienten mit pathologischer Fraktur bei maligner Grunderkrankung, renaler Osteodystrophie, chronisch-entzündlichen oder degenerativen Gelenkerkrankungen (z. B. Rheumatoide Arthritis, Koxarthrose), chronischen Störungen im Calcium-/Phosphathaushalt (z.B. hypophosphatämische Rachitiden/Hyperphosphatämie) sowie alle, bei denen eine Bildgebung mit CT und/oder MRT nicht möglich war oder einer Teilnahme nicht zugestimmt haben bzw. bei denen aufgrund kognitiver Einschränkungen keine Einwilligungsfähigkeit gegeben war, wurden von der Teilnahme ausgeschlossen.

3.1 Studienablauf

Potentielle Studienteilnehmer wurden im Aufnahmebuch der chirurgischen Notaufnahme identifiziert, während des stationären Aufenthalts über die Studie informiert und zur Teilnahme eingeladen. Sofern die Patienten die Voraussetzungen für eine Studienteilnahme erfüllten und keine Kontraindikationen bestanden, erhielten sie zusätzlich zu der klassischen präoperativen Bildgebung (Röntgen in zwei Ebenen + CT) eine präoperative MRT des OSG. Patienten, die vor der operativen Versorgung der Fraktur nicht über die Studie informiert werden konnten, wurden unabhängig von den Modalitäten der präoperativen Bildgebung während der postoperativen stationären Behandlung zur Teilnahme eingeladen.

Die MRT-Bilder wurden durch Dr. med. T. Beyer (Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Kinder- und Neuroradiologie der Universitätsmedizin Rostock, Direktor: Prof. Dr. M.-A. Weber) mit Blick auf Schäden des medialen und lateralen Bandapparates, der Syndesmose, Sehnen und Muskeln, sowie osteochondrale Verletzungen beurteilt.

Neben der Studienuntersuchung im Rahmen des stationären Aufenthaltes erfolgten weitere Untersuchungen um die Heilung der Fraktur sowie die Funktion des OSG zu verfolgen. Abbildung 4 veranschaulicht das longitudinale Design und den Inhalt der Studienuntersuchungen.

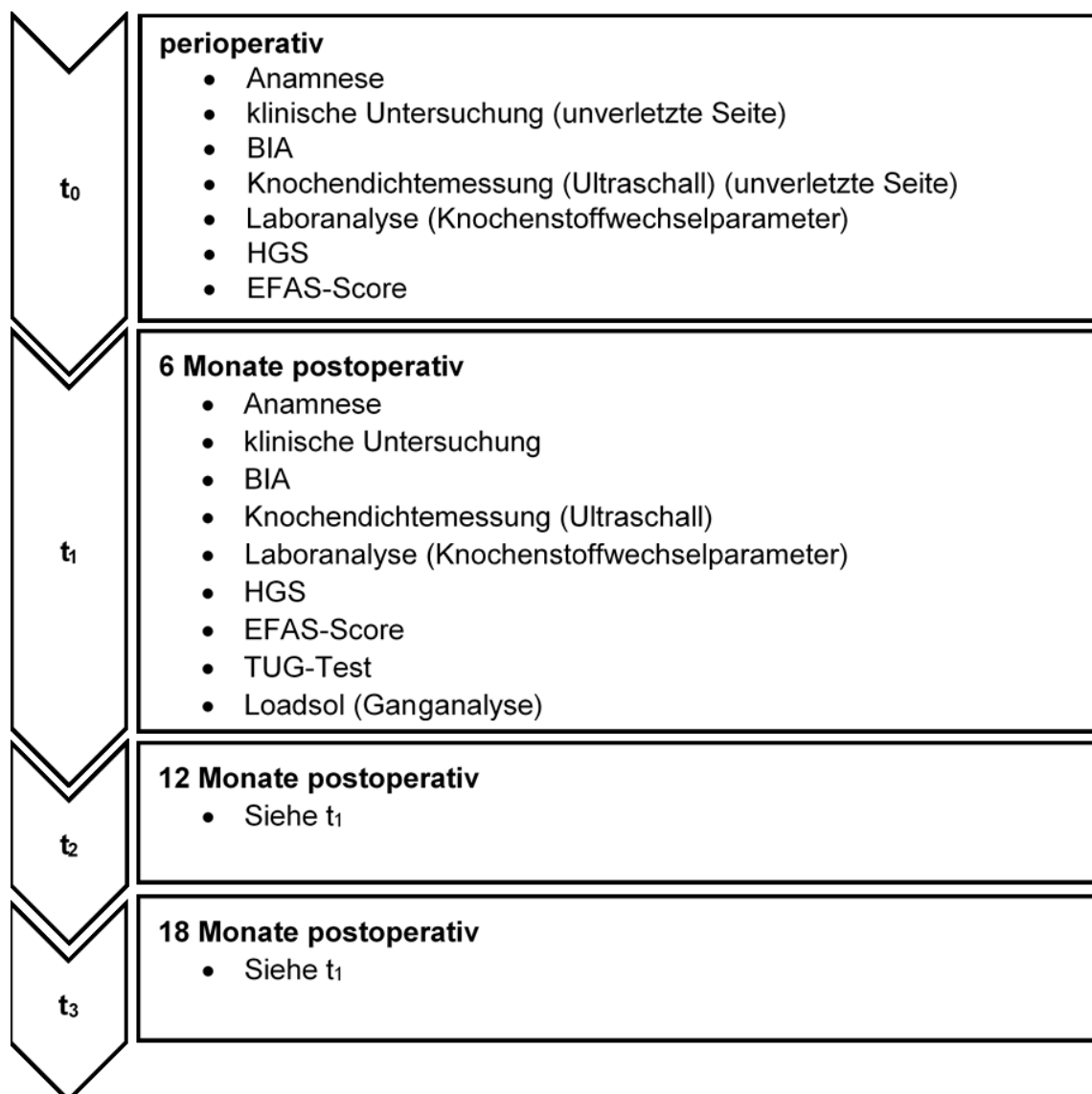


Abb. 4: Ablauf und Inhalt der Studienuntersuchungen

Abkürzungen: HGS = Hand-Grip-Strength, BIA = Bioelektrische Impedanzanalyse, TUG-Test = Timed "Up and Go"-Test

3.2 Anamnese und klinische Untersuchung

Bei Studieneinschluss wurde eine Anamnese mit besonderem Fokus auf muskuloskelettale Vorerkrankungen (Osteoporose, Arthrose, rheumatische Erkrankungen, frühere Frakturen etc.), weitere Vorerkrankungen sowie frühere Operationen und den Unfallhergang erhoben. Zudem erfolgte eine Sozial-, Suchtmittel-, und Medikamentenanamnese, wobei gezielt nach solchen Medikamenten gefragt wurde, die einen Einfluss auf den Knochenstoffwechsel haben. Bei den poststationären Nachuntersuchungen standen aktuelle Beschwerden und Funktionseinschränkungen sowie aufgetretene Komplikationen im Mittelpunkt der Anamnese.

Die Untersuchung von Unterschenkel und Fuß fokussierte auf die Erfassung von Schmerzen, Achsenfehlstellungen, Ödemen und sonstigen Auffälligkeiten. Die Patienten wurden zum Zeitpunkt t_0 zu ihrer Fähigkeit zum Fersen- und Vorfußstand befragt. Während der Nachuntersuchungen wurden diese Fähigkeiten überprüft.

Der Bewegungsumfang der Sprunggelenke (range of motion, ROM) wurde mit einem Goniometer gemessen. Zudem wurden die Knöchelumfänge ermittelt. Die Untersuchungen wurden ab t_1 auf beiden Seiten durchgeführt und alle Befunde auf die unverletzte Seite normiert.

Zum Zeitpunkt t_0 wurden Größe und Gewicht lediglich erfragt, zu den Nachuntersuchungen wurden diese Parameter mit einer Waage mit integriertem Stadiometer (seca GmbH & Co. KG, Hamburg) erfasst.

Um die physischen Voraussetzungen der Studienteilnehmer besser zu charakterisieren und Veränderungen des Muskel-Fett-Verhältnisses im postoperativen Verlauf zu erkennen, wurde eine Impedanzanalyse mit einem Multifrequenz Impedanzspektrometer (BodyCompositionMonitor, Fresenius medical care, Bad Homburg) durchgeführt. Für die Auswertung wurden der Body mass index (BMI in kg/m^2) sowie die relativen Anteile der Muskel- (Lean tissue mass, LTM) und Fettmasse an der Körpermasse berücksichtigt.

3.3 Quantitative Bestimmung von Markern des Knochenstoffwechsels in Serum bzw. Plasma

Venöse Blutproben (Serum- und EDTA-Monovetten, SARSTEDT AG & Co. KG, Nümbrecht) wurden zu den Untersuchungszeitpunkten entnommen, im Forschungslabor der AG Experimentelle Pädiatrie der Kinder- und Jugendklinik der UMR aufgearbeitet und bis zur Analyse bei -80 °C gelagert. In den Proben wurden die Aktivitäten der knochenspezifischen alkalischen Phosphatase (BAP) und der aktiven Isoform 5b der Tartrat-resistenten sauren Phosphatase (TRAP 5b) mit kommerziell verfügbaren Assays entsprechend der Protokollangaben des Herstellers (Immundiagnosticsystems (Boldon, UK)) bestimmt. Die Konzentrationen von intaktem FGF-23 wurde mit dem ELISA der Firma Kainos Laboratories Inc. (Tokyo, Japan), die von Sclerostin und α -Klotho wurden mit ELISAs von TECOmedical (Sissach, Schweiz) und Immuno-Biological Laboratories Co. (Gunma, Japan) bestimmt. Alle Messungen wurden als Doppelbestimmungen durchgeführt. Sofern beide Ergebnisse um mehr als 15% voneinander abwichen, wurde die Bestimmung mit einem frischen Aliquot wiederholt.

3.4 Bestimmung der Knochendichte durch Pulsechographie

Die Einschätzung des Osteoporoserisikos erfolgte mit Hilfe der quantitativen Pulsechographie (Bindex®-Ultraschallsonde, Modell BI-100, BoneIndex Finland Ltd., Kuopio, Finnland). Vor der Messung wurde das Gerät nach Herstellerangaben kalibriert. Die Dicke der Kortikalis wird an einem definierten anatomischen Punkt der Tibia aus den unterschiedlichen Laufzeiten der senkrecht eingestrahlt und von der peri- und endostalen Knochenoberfläche reflektierten Ultraschallwellen berechnet (BoneIndex Finland Ltd., Kuopio, Finnland). Die gerätespezifische Software ermittelt aus diesen Daten und unter Berücksichtigung von Alter, Gewicht, Größe, Geschlecht und Ethnie sowie Informationen zu bekannten Risikofaktoren (anamnestische Frakturen, Hüftfraktur der Eltern, Einnahme von Glucocorticoiden, Rheumatische Arthritis, sekundäre Osteoporose, Alkohol- und Nikotinkonsum) einen Density Index (DI) und liefert eine Abschätzung des Osteoporose-Risikos (hohes Risiko: $DI < 0,779 \text{ g/cm}^2$; mittleres Risiko bzw. weitere Diagnostik (DXA) erforderlich: $0,779 - 0,844 \text{ g/cm}^2$; geringes Risiko: $DI > 0,844 \text{ g/cm}^2$).

Die Untersuchung wurde am entkleideten und ausgestreckten Bein durchgeführt. Der Abstand zwischen medialem Kniegelenkspalt und dem distalen Ende des

Malleolus medialis wurde gemessen und der Punkt, der ein Drittel vom proximalen Ende der Tibia entfernt liegt mit einem Stift markiert, um dort die Pulsechographie durchzuführen. Das Handstück mit integriertem Ultraschall-generator und -detektor wurde senkrecht auf die Knochenoberfläche aufgesetzt. Bei ausreichender Signalqualität erfolgte ein optischer/akustischer Hinweis und die Daten wurden automatisch gespeichert. Um ein Ergebnis zu erhalten waren je 5 Messsignale nötig. Die Ergebnisse der 5 Messungen konnten miteinander verglichen werden und bei deutlich vom Mittelwert abweichenden Ergebnissen wurde die jeweilige Messung wiederholt. Anschließend berechnete die Software den Density Index.

Die Messung erfolgte zum Zeitpunkt t_0 auf der gesunden Seite und zu den Nachuntersuchungen beidseitig.

3.5 Bestimmung der Griffkraft

Die Griffkraft wurde mit einem hydraulischen Hand-Dynamometer (Jamar®) ermittelt. Entsprechend der Empfehlungen der American Society of Hand Therapists (ASHT) nahmen die Patienten aufrecht sitzend auf einem Stuhl ohne Armlehnen, mit adduzierter Schulter und einem im Ellenbogen 90 Grad flektiertem Arm Platz. Unterarm und Handgelenk werden in der Neutral-Null-Position gehalten und das Dynamometer mit allen Fingern einer Hand umfasst (Mathiowetz et al. 1984).

Der Patient wurde gebeten, das Dynamometer mit maximaler Kraft zu drücken. Die Messung wurde mit der linken und rechten Hand mit kurzen Erholungspausen je 3 Mal wiederholt. Anschließend wurde für jede Hand der Mittelwert aus den 3 Messungen gebildet. Unter Verwendung der vom Hersteller empfohlenen alters- und geschlechtsspezifischen Mittelwerte und Standardabweichungen wurden individuelle Z-Scores berechnet (Mathiowetz et al. 1985).

3.6 Erhebung des EFAS-Scores

Zur Evaluierung der subjektiven Beschwerden am Sprunggelenk wurde der EFAS-Score verwendet (siehe Anhang). Er besteht aus sechs allgemeinen Fragen (Teil 1) sowie vier Sportfragen (Teil 2) und die Antworten sind auf einer aufsteigenden Skala (0-4) vorgegeben. Der Score umfasst die Komponenten Schmerz und körperliche Funktion in Ruhe und während unterschiedlichen Aktivitäten. Zum Zeitpunkt t_0 beantworteten die Teilnehmer den Fragebogen

bezogen auf den Zustand vor der Fraktur, zu den Zeitpunkten t_1 - t_3 bezogen auf den Zustand des Sprunggelenks in der letzten Woche.

Insgesamt konnten maximal 24 Punkte im allgemeinen Teil und 16 Punkte im Sportteil erreicht werden. Dabei steht „0“ immer für die schlechteste und „24“ bzw. „16“ für die beste Option. Für die Auswertung wurden in beiden Teilen die jeweils erreichte Punktzahl ermittelt und in einen relativen Score, bezogen auf die maximal erreichbare Punktzahl, umgerechnet. Als „nicht zutreffend“ beantwortete Fragen wurden von der Wertung ausgenommen.

3.7 Beurteilung der Mobilität mit dem Timed "Up and Go"-Test

Zur Beurteilung der Mobilität mit dem TUG wurden ein Stuhl mit Armlehnen, eine in 3 m Entfernung zur Vorderkante des Stuhls angebrachte Markierung auf dem Boden sowie eine Stoppuhr benötigt. Der Patient wurde gebeten, auf dem Stuhl Platz zu nehmen. Die dann folgende Anweisung lautete: „Stehen Sie bitte aus diesem Stuhl auf, gehen bis zu dieser Markierung, drehen sich um und setzen Sie sich wieder genauso hin (üblicherweise im Alltag verwendete Gehhilfen dürfen benutzt werden). Ich werde die Zeit messen, die Sie dafür brauchen“ (DVO e.V. 2023). Die Bewertung erfolgte in Anlehnung an die DVO Leitlinie zur Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose (2023):

≤ 10 Sekunden	Gutes Ergebnis, keine Mobilitätsstörung
11 - 29 Sekunden	Mittleres Ergebnis, Mobilitätsstörung nicht auszuschließen
≥ 30 Sekunden	Schlechtes Ergebnis, Mobilitätsstörung anzunehmen

3.8 Dynamische Messung der Bodenreaktionskraft

Um die Gangsymmetrie der Studienteilnehmer darzustellen, erfolgte die dynamische Messung der Bodenreaktionskraft. Dazu wurde das aus flexiblen Einlegesohlen mit einem integrierten Sensor (Abbildung 5) und einer Bluetooth-Verbindung zur Loadsol®-App auf einem mobilen Endgerät bestehende Loadsol®-System (novel GmbH, München) verwendet.



Abb. 5: Loadsol®-Einlegesohlen mit geöffnetem Datentransmitter links

Alle Teilnehmer trugen mit dem Loadsol-System ausgestatteten Sportschuhe (LICO Sportschuh MARVIN V aus Nylon mit Klettverschlüssen) in der passenden Konfektionsgröße.

Mit einem Smartphone (iPhone XR) wurde die Verbindung zu den Sensoren hergestellt. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte nach Herstellerangaben, hierfür mussten die Studienteilnehmer abwechselnd auf einem Bein stehen. Während der gesamten Messung erfolgte in Echtzeit die Übertragung der Daten in die App.

Die Ganganalyse wurde auf einer standardisierten Teststrecke durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Messung auf einem ebenem Krankenhausflur mit einer Länge von ca. 55 Metern. Daraufhin wurden die Patienten gebeten, einen Treppenabsatz (12 Stufen) hinunterzugehen, direkt zu wenden und diesen wieder hinaufzugehen. Die letzte Messung erfolgte im Außengelände der Klinik (Abbildung 6). Dort gingen die Patienten zunächst auf einem gepflasterten Weg mit leichter Neigung, danach auf Kopfsteinpflaster und zuletzt auf einem naturbelassenen Weg im Klinikgarten (insg. ca. 150 m).



Abb. 6 A-C: Strecke der Ganganalyse im Außengelände der Klinik
Gepflasterter Weg (A), Kopfsteinpflaster (B), naturbelassener Weg im Klinikgarten(C)

Die erfassten Daten beinhalten neben der absoluten Schrittzahl die durchschnittliche Kadenz (Schritte/min), Kontaktzeit pro Schritt (ms), peak force (N) und loading rate (N/s) sowie den Factor of imbalance (FOIB) (1). Dieser beschreibt die Abweichung von einer gleichmäßigen Belastung beider Füße auf Basis eines Kraft-Zeit-Integrals (FTI) (2) für die rechte (R) bzw. linke (L) Sohle. Um die Gangsymmetrie zu beurteilen, wurde in der Auswertung der FOIB berücksichtigt.

$$(1) FTI = \int_0^t f(F) dt$$

$$(2) FOIB = \frac{|FTI_L - FTI_R|}{FTI_L + FTI_R}$$

3.9 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden in Excel 2019 (Version 1808, Microsoft) gespeichert. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS Statistics 25 (IBM). Die grafische Darstellung erfolgte mit SigmaPlot 13.0 (Systat Software Inc.)

Aufgrund der kleinen Studienpopulation wurden alle Daten als nicht-normalverteilt angenommen. Kontinuierliche Variablen wurden mit Median sowie Minimum und Maximum angegeben. Die in den Abbildungen dargestellten Mediane beziehen sich auf die gesamte Studienpopulation. Für nominale Variablen wurden Häufigkeiten angegeben.

Es wurden ausschließlich nicht-parametrische Testverfahren angewendet. Gruppenvergleiche erfolgten mit dem Mann-Whitney-U-Test (ungepaarte Proben) und mit dem Wilcoxon-Test (gepaarte Proben). Um Zusammenhänge zwischen allen mindestens ordinalskalierten Variablen zu prüfen, wurden Rangkoeffizienten nach Spearman gebildet. Alle Tests wurden zweiseitig durchgeführt, ein Unterschied von $p < 0,05$ wurde als signifikant gewertet.

4 Ergebnisse

Im Zeitraum von 01/2019 bis 10/2021 stellten sich 408 Patienten mit einer OSG-Fraktur in der chirurgischen Notaufnahme der Klinik für Unfall- Hand- und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsmedizin Rostock vor, letztlich stimmten 22 Patienten einer Studienteilnahme zu (Abbindung 7). Die Studienteilnehmer, bei denen eine präoperative MTR zur Beurteilung der Weichteilsituation vorlag, bildeten die MRT^+ -Gruppe, die restlichen Patienten wurden der MRT^- -Gruppe zugeordnet. Leider konnten nicht alle Probanden an allen vier Untersuchungen teilnehmen. Gründe dafür waren die verzögerte Rekrutierung von 5 Patienten der MRT^- -Gruppe, in drei Fällen gesundheitliche Probleme sowie in einem Fall mangelndes Interesse an der weiteren Teilnahme. Letztendlich nahmen in den MRT^+ - und MRT^- -Gruppen zu den Zeitpunkten t_0 $n=12/n=5$, t_1 $n=11/n=7$, t_2 $n=10/n=8$ und t_3 $n=10/n=7$ Probanden an der Studie teil. Da zusätzlich nicht immer alle Befunde vollständig erhoben werden konnten, wird die Anzahl der Probanden pro Untersuchung in den jeweiligen Legenden vermerkt.

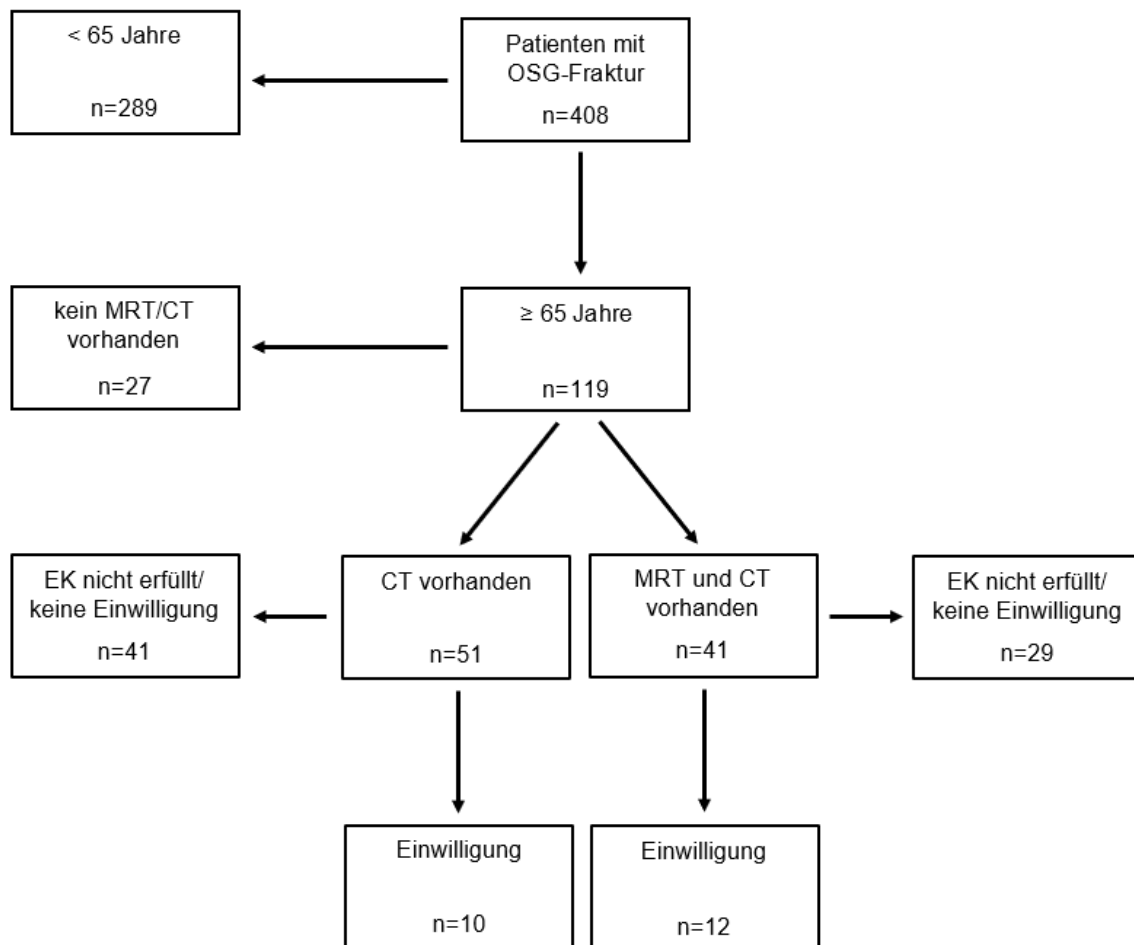


Abb. 7: Übersicht zur Anzahl der prinzipiell für die Studie geeigneten und letztlich eingeschlossenen Patienten

EK = Einschlusskriterien

Die Zeit zwischen Fraktur und Operation betrug im Median 6 Tage (0-10 Tage), die Eingangsuntersuchung fand im Median 8 Tage (2-15 Tage) nach Fraktur statt. In Tabelle 1 sind die Intervalle zwischen Fraktur und den Follow-up-Untersuchungen zusammengefasst. Abweichungen zwischen dem Termin den geplanten und den tatsächlichen Follow-up-Untersuchungen waren vor allem auf die Lockdowns zwischen 03/2020 und 12/2020 im Rahmen der Corona-Pandemie zurückzuführen.

Tab. 1: Intervalle zwischen Fraktur und Nachuntersuchungen

Fx - t ₁	Fx - t ₂	Fx - t ₃
6,42 Monate (5,95 - 9,07)	12,39 Monate (11,93 - 15,21)	18,27 Monate (17,84 - 20,21)

4.1 Anthropometrische und klinische Charakteristika der Studienteilnehmer

Die anthropometrischen Daten der Patienten bei Studieneinschluss sind in Tabelle 2 und die Ergebnisse der BIA in Abbildung 8 A-C zusammengefasst. Die medianen BMI-Werte lagen konstant im präadipösen Bereich (25 - 29,9 kg/m²). Im longitudinalen Verlauf zeigte sich eine Verschiebung der Körperzusammensetzung mit prozentualer Abnahme des Körperfettanteils und Zunahme der Muskelmasse, welche zwischen t₁ und t₂ signifikant war. Für BMI, LTM und FAT konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen dargestellt werden.

Tab. 2: Anthropometrische Charakteristika der Probanden

	Alle (4m/18w)	MRT ⁺ (1m/11w)	MRT ⁻ (3m/7w)
Alter (Jahre)	72 (65 - 84)	74 (65 - 84)	70,5 (66 - 79)
Größe (m)			
männlich	176 (168 - 180)	180	176 (168 - 176)
weiblich	165 (152 - 172)	162 (152 - 170) *	168 (163 - 172) *
Gewicht (kg)			
männlich	87,7 (69,60 - 95,00)	87	88,5 (69,6 - 95)
weiblich	73,5 (50 - 113,8)	72,5 (50 - 77) *	85,7 (57,8 - 113,8) *

*Alle Werte sind mit Median und Range angegeben. * = signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (p<0,05; MWU-Test)*

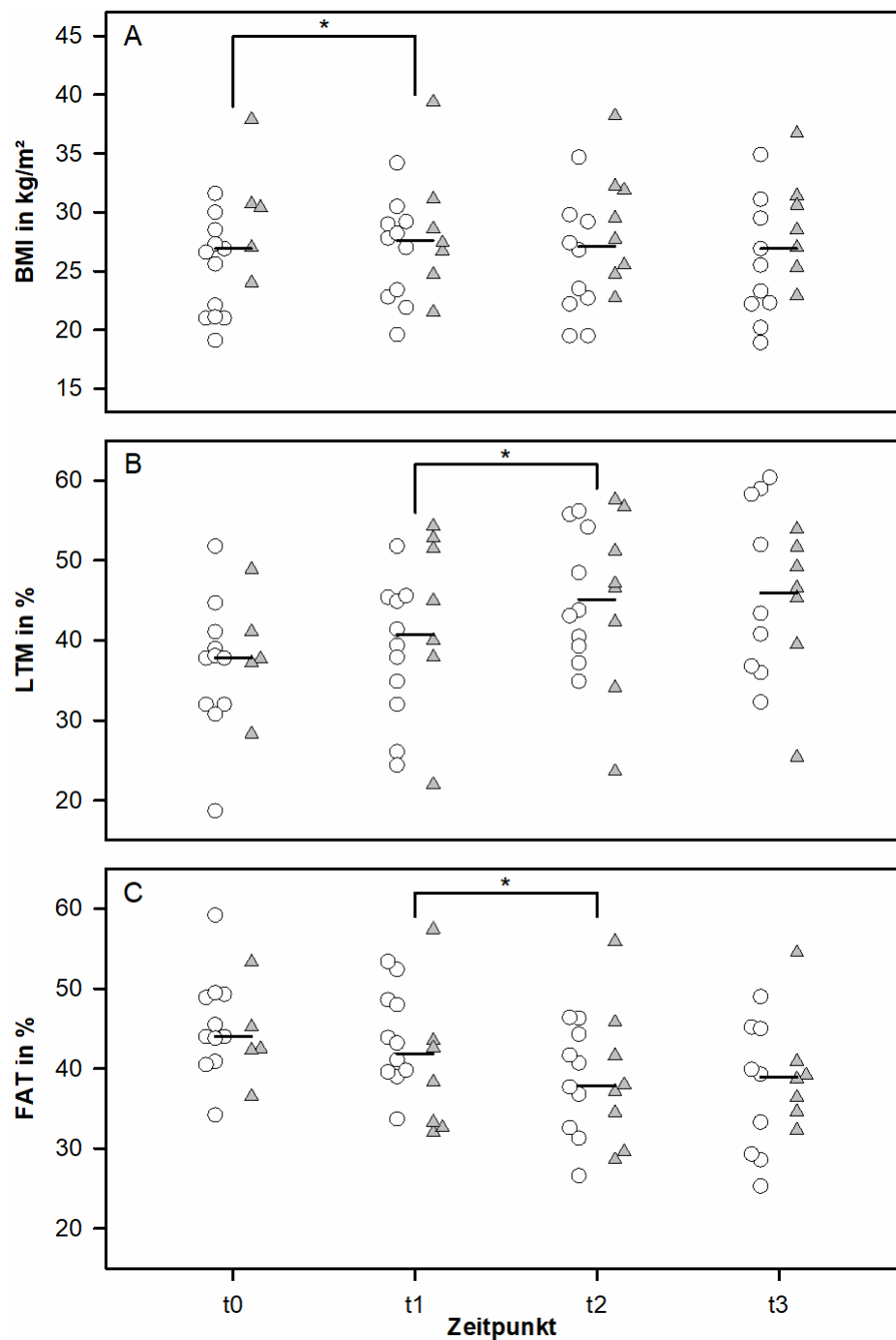


Abb. 8 A-C: Darstellung von BMI, relativer fettfreier Körpermasse und relativer Speicherfettmasse in Relation zum Verlauf von t_0 bis t_3

○ = MRT⁺ - Gruppe, △ = MRT⁻ - Gruppe, *= $p < 0,05$ signifikant im Wilcoxon-Test. Es lagen in der MRT⁺ - Gruppe bzw. MRT⁻ - Gruppe zu den Zeitpunkten t_0 $n=11/n=5$, t_1 $n=11/n=7$, t_2 $n=10/n=8$ und t_3 $n=10$ (BMI) bzw. 9 (LTM/FAT) / $n=7$ Untersuchungen vor. LTM (lean tissue mass) = fettfreie Körpermasse, FAT = Speicherfettmasse. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

Am häufigsten nahmen Patienten der MRT⁺- bzw. MRT⁻-Gruppe Antihypertensiva ein (n=8/n=6). Weitere der häufig verabreichten Medikamente waren Blutverdünner (n=6/n=2), Schilddrüsenhormone (n=4/n=2), Protonenpumpeninhibitoren (n=2/n=4), Diuretika (n=3/n=2), Lipidsenker (n=2/n=3) und Antiepileptika (n=2/n=2). Bei je einem Patienten erfolgte eine Therapie mit inhalativen Glucocorticoiden.

In der MRT⁺-Gruppe litt die Hälfte der Patienten an maximal 2 chronischen Erkrankungen. Unter anderem traten Bluthochdruck und Asthma auf. Fünf Patienten hatten 3 oder mehr chronische Erkrankungen. Eine weitere Patientin litt an einem metastasierten Tumor mit weiteren Komorbiditäten. Bei drei der Patienten war zum Zeitpunkt des Studieneinschlusses eine Osteoporose bekannt, zwei davon wurden mit Alendronat behandelt. In der MRT⁻-Gruppe hatten 8 Patienten maximal 2 chronische Erkrankungen. Am häufigsten trat in dieser Gruppe ein Bluthochdruck auf. Zwei Patienten litten an 3 oder mehr chronischen Erkrankungen. Bei einem der Patienten war eine Osteoporose vorbekannt und wurde mit Alendronat behandelt.

4.1.1 Frakturtyp, Behandlung und Komplikationen

In Tabelle 3 ist die Aufteilung der Frakturtypen nach AO-Klassifikation dargestellt.

Tab. 3: Häufigkeit der Frakturtypen nach AO-Klassifikation in den Studien-
gruppen

		MRT ⁺	MRT ⁻
Frakturtypen	A2	1	
	B1	3	2
	B2	2	
	B3	3	6
	C1		2
	C2	2	
	C3	1	

In der MRT⁺-Gruppe erhielten drei Patienten vor der definitiven Versorgung (Platten-/Schraubenosteosynthese) wegen der Weichteilverhältnisse zunächst einen Fixateur externe. In der MRT⁻-Gruppe waren es 5 Patienten. Die operative Versorgung erfolgte in der Regel durch ORIF. Eine Patientin der MRT⁺-Gruppe

wurde konservativ behandelt, eine der MRT⁻-Gruppe wurde mit Kirschnerdrähten versorgt.

Die über den gesamten Studienverlauf hinweg am häufigsten angegebenen Symptome waren in beiden Gruppen Schmerzen (Ruheschmerz, Belastungsschmerz), Schwellungen, Nervenbeschwerden (Parästhesien, Taubheitsgefühle) sowie Gelenksteifheit und Druckgefühl im OSG. Bei der Mehrheit der Patienten kam es zu einer Symptomverbesserung im Verlauf, allerdings gaben alle Patienten zum Zeitpunkt t₃ Restbeschwerden an. Bei zwei Patienten der MRT⁺- und drei Patienten der MRT⁻-Gruppe kam es zu Wundheilungsstörungen bzw. Weichteilkomplikationen.

4.2 Ergebnisse der präoperativen MRT-Diagnostik

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der mit Hilfe eines standardisierten Befundungsschemas ausgewerteten MRT-Untersuchungen.

Im Bereich der Syndesmose kam es deutlich häufiger zu Rupturen des Lig. tibiofibulare anterius und der Membrana interossea als des Lig. tibiofibulare posterius. Dort kam es stattdessen gehäuft zu knöchernen Ausrissen. Nur bei einer Patientin waren alle Bänder der Syndesmose gerissen. Im Bereich des Außenbandapparates war das Lig. fibulotalare anterius am häufigsten von einer Ruptur betroffen. Der Innenbandapparat wies insgesamt seltener Rupturen auf, allerdings war die Darstellbarkeit von Rupturen in dieser Lokalisation häufiger eingeschränkt. Osteochondrale Läsionen konnten bei einem Viertel der untersuchten Patienten dargestellt werden.

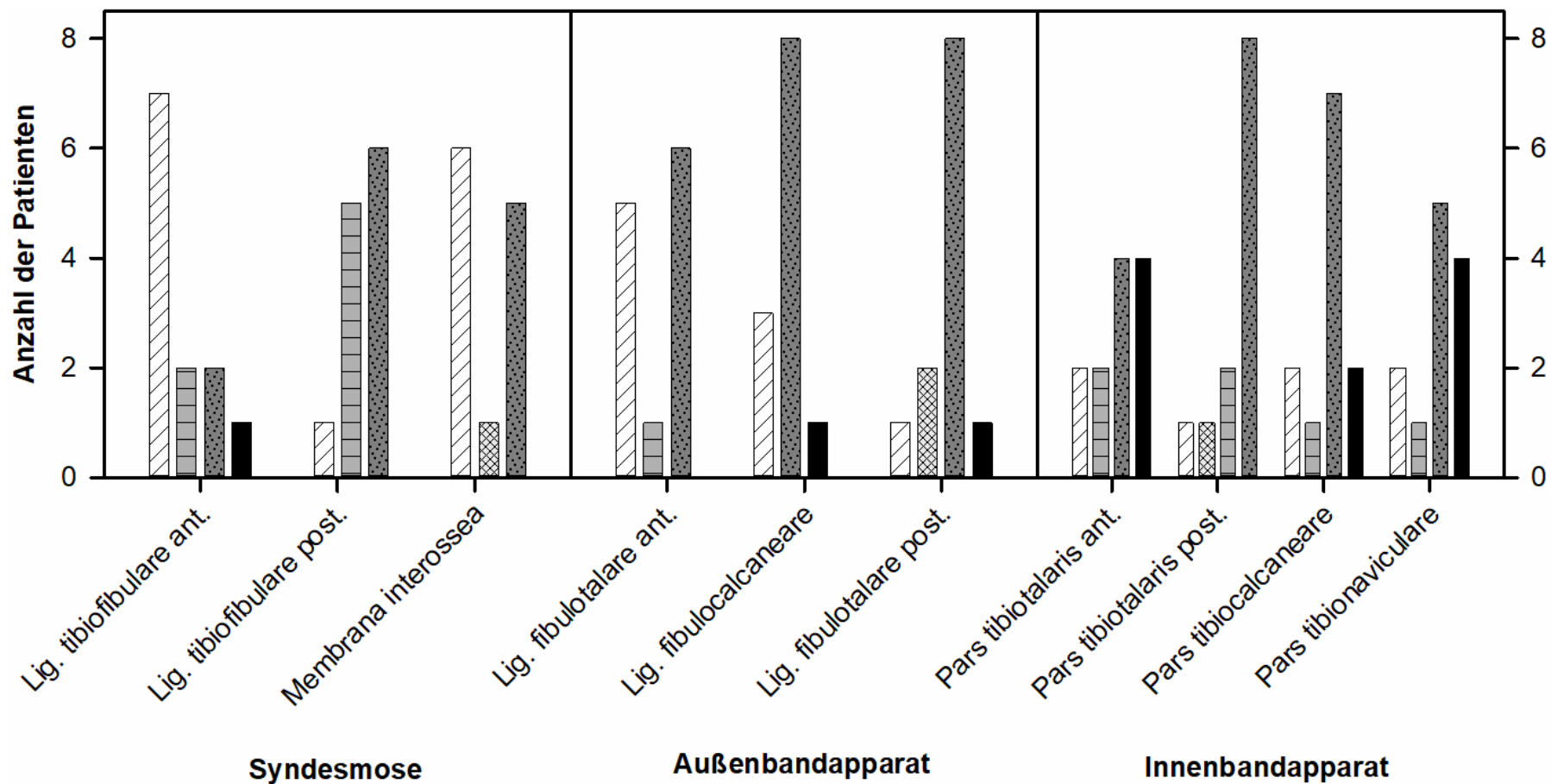


Abb. 9: präoperative Beurteilung des Bandapparates mittels MRT

= Ruptur,
 = Partialruptur,
 = knöcherner Ausriss,
 = intakt,
 = nicht beurteilbar

4.3 Ergebnisse der klinischen Untersuchung des oberen Sprunggelenks

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die normierten Werte zeigen in beiden Gruppen zu allen Zeitpunkten ein im Median größeren Knöchelumfang der frakturierten Seite. Zudem zeigt sich bei Dorsalextension /Plantarflexion als auch bei Inversion/Eversion eine verminderte Beweglichkeit des frakturierten Sprunggelenks im Vergleich zur Gegenseite, welche sich auch im Laufe von 18 Monaten nicht signifikant besserte.

Tab. 4: ROM des OSG und Knöchelumfänge

		MRT ⁺	MRT ⁻
Knöchelumfang	t1	1,08 (0,93-1,14)	1,04 (1,02-1,20)
	t2	1,07 (1,00-1,15)	1,05 (1,00-1,12)
	t3	1,07 (1,02-1,15) **	1,02 (1,00-1,09) **
ROM Inversion/Eversion	t1	0,88 (0,27-1,18)	0,59 (0,48-1,14)
	t2	0,77 (0,31-1,40)	0,83 (0,65-1,15)
	t3	0,73 (0,40-1,32)	0,89 (0,41-1,00)
ROM Dorsalextension/ Plantarflexion	t1	1,00 (0,50-1,43)	0,82 (0,60-1,00)
	t2	0,73 (0,43-1,04)	0,78 (0,53-1,03)
	t3	0,82 (0,25-1,04)	0,70 (0,65-0,95)

*Alle Werte sind normiert (frakturiert/nicht frakturiert) und mit Median und Range angegeben. Abkürzung: ROM=Range of motion. ** = signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p < 0,01$; MWU-Test). An der klinischen Untersuchung des Sprunggelenks nahmen in der Interventions- bzw. Kontrollgruppe zu den Zeitpunkten t_1 $n=10$ / $n=7$, t_2 $n=10$ / $n=8$ und t_3 $n=10$ / $n=7$ Patienten teil.*

Die Patienten wurden gebeten, sich auf den Vorfuß und auf die Fersen zu stellen. Der Fersenstand fiel den Patienten bis auf ein ausgeglichenes Ergebnis zum Zeitpunkt t_3 in der MRT⁺-Gruppe schwerer als der Vorfußstand. Trotzdem gelang es beinahe allen Patienten, die Übungen durchzuführen. Es konnten jedoch weniger Patienten die Übungen ohne Festhalten absolvieren als vor der Fraktur. Die Ausführung der Übung unterschied sich nicht zwischen den beiden Gruppen.

4.4 Griffkraft-Messung als Indikator für allgemeine körperliche Kraft

Die Ergebnisse der Griffkraft-Messungen sind in Abbildung 10 als individuelle Standardabweichung (Z-Wert) von den vom Hersteller angegebenen alters- und geschlechtsspezifischen Normwerten angegeben. Die Griffkraft nahm zwischen t_0 und t_1 signifikant ab und blieb zu den Zeitpunkten t_2 und t_3 auf dem Niveau von t_1 . Signifikante Unterschiede zwischen der MRT^+ - und MRT^- -Gruppe konnten zu den Zeitpunkten t_2 und t_3 festgestellt werden (t_2 : Median MRT^+ < Median MRT^- ; t_3 : Median MRT^+ < Median MRT^- , $p < 0,05$ signifikant im MWU-Test).

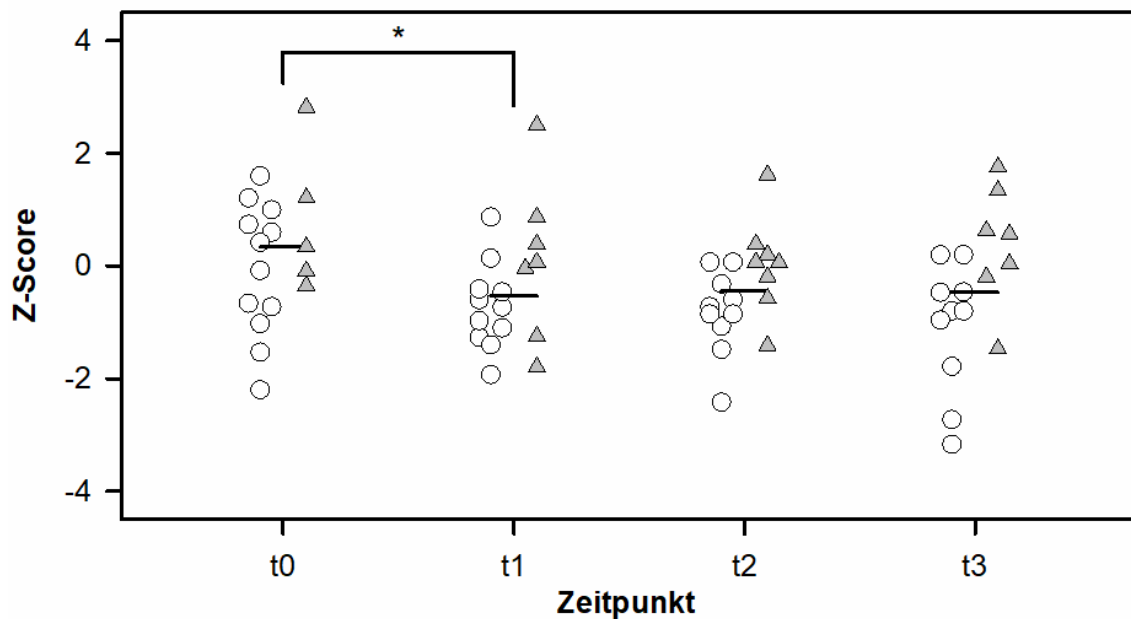


Abb. 10: Darstellung der Z-Scores der Griffkraft relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3

○ = MRT^+ - Gruppe, △ = MRT^- - Gruppe, * = $p < 0,05$ signifikant im Wilcoxon-Test. Es lagen in der MRT^+ - Gruppe bzw. MRT^- - Gruppe zu den Zeitpunkten t_0 $n=12/n=5$, t_1 $n=11/n=7$, t_2 $n=10/n=8$ und t_3 $n=10/n=7$ Untersuchungen vor. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

4.5 Ergebnisse klinischer Scores und Funktionstests zur Beurteilung von Mobilität und Funktionseinschränkungen des Sprunggelenks

4.5.1 Der EFAS-Score

Die Ergebnisse des EFAS-Scores und des dazugehörigen Sport-Scores sind in Abbildung 11 dargestellt.

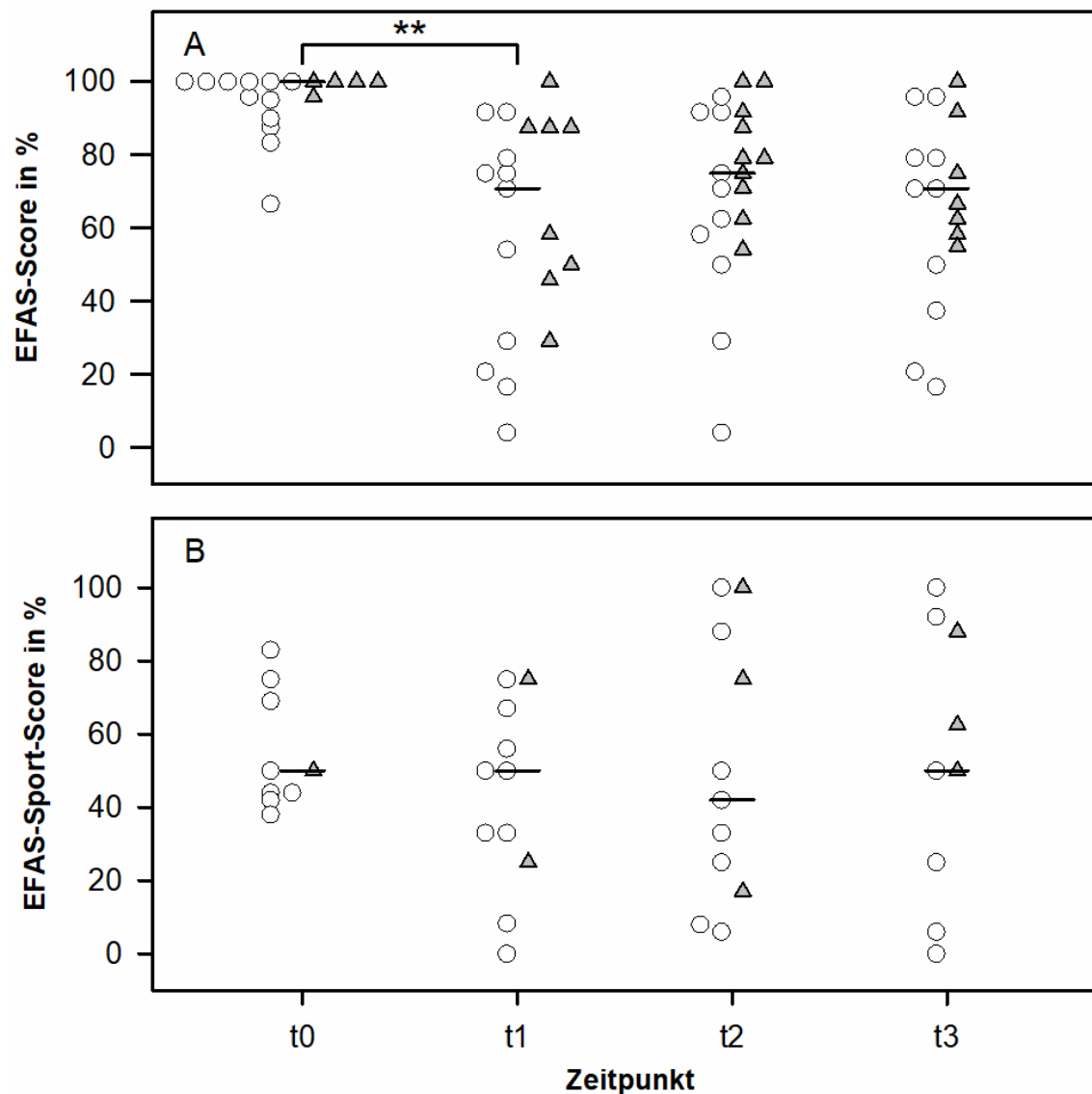


Abb. 11 A, B: Darstellung des EFAS-Scores und EFAS-Sport-Score relativ zum Verlauf von t₀ bis t₃

○ = MRT⁺ -Gruppe, △ = MRT⁻ -Gruppe, **= $p < 0,01$ signifikant im Wilcoxon-Test. Es lagen in der MRT⁺ -Gruppe bzw. MRT⁻ -Gruppe zu den Zeitpunkten t₀ n=12/n=5, t₁ n=11/n=8, t₂ n=10/n=10 und t₃ n=10/n=7 ausgefüllte Fragebögen vor. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen. Die MRT⁺-Gruppe erreichte 6 Monate postoperativ einen signifikant schlechteren EFAS-Score als vor der Fraktur. Zudem kam es in beiden Gruppen zu keiner signifikanten Verbesserung des Scores im Verlauf. Die Patienten erreichten im Median im Sport-Score deutlich schlechtere Ergebnisse als im allgemeinen Teil. Ein hoher EFAS-Score korrelierte positiv mit einer hohen Griffkraft (Tabelle 5).

Tab. 5: Korrelation des EFAS-Score mit der Griffkraft

		Griffkraft MRT ⁺				Griffkraft MRT ⁻			
		t ₀	t ₁	t ₂	t ₃	t ₀	t ₁	t ₂	t ₃
EFAS-Score in %	t ₀	0,28				0,35			
	t ₁		0,77**				0,70		
	t ₂			0,88**				0,65	
	t ₃				0,22				0,65

*Korrelationskoeffizient nach Spearman: ** = $p < 0,01$ signifikant*

Wurden alle Fragen zum Sport-Score als „nicht zutreffend“ angegeben, konnte dieser nicht berechnet werden. Dies betraf in der MRT⁺-Gruppe bzw. MRT⁻-Gruppe zu den Zeitpunkten t₀ n=4/n=3, t₁ n=2/n=4, t₂ n=2/n=5 und t₃ n=4/n=3 Patienten.

4.5.2 Beurteilung der Mobilität durch den Timed "Up and Go"-Test

Für den TUG lagen in der MRT⁺-Gruppe bzw. MRT⁻-Gruppe zu den Zeitpunkten t₁ n=11/n=7, t₂ n=10/n=8 und t₃ n=10/n=7 Untersuchungen vor. Während in der MRT⁻-Gruppe alle Patienten stets ein gutes Ergebnis erreichten, erzielten in der MRT⁺-Gruppe zu den Zeitpunkten t₁, t₂ und t₃ je 2, 3 und 2 Patienten ein mittleres und eine Patientin stets ein schlechtes Ergebnis.

4.5.3 Der Factor of Imbalance beim Gehen auf verschiedenen Untergründen

In beiden Gruppen zeigten sich beim Treppensteigen 6 und 12 Monate nach Fraktur deutliche Asymmetrien im Vergleich zum Gehen auf ebenem Boden oder im Außengelände, welche nach 18 Monaten nicht mehr darstellbar waren. Weder in der MRT⁺- noch in der MRT⁻-Gruppe erreichten die Patienten eine signifikante Verbesserung der Gangsymmetrie im Verlauf von t₁ bis t₃ und beide Gruppen unterschieden sich nicht signifikant.

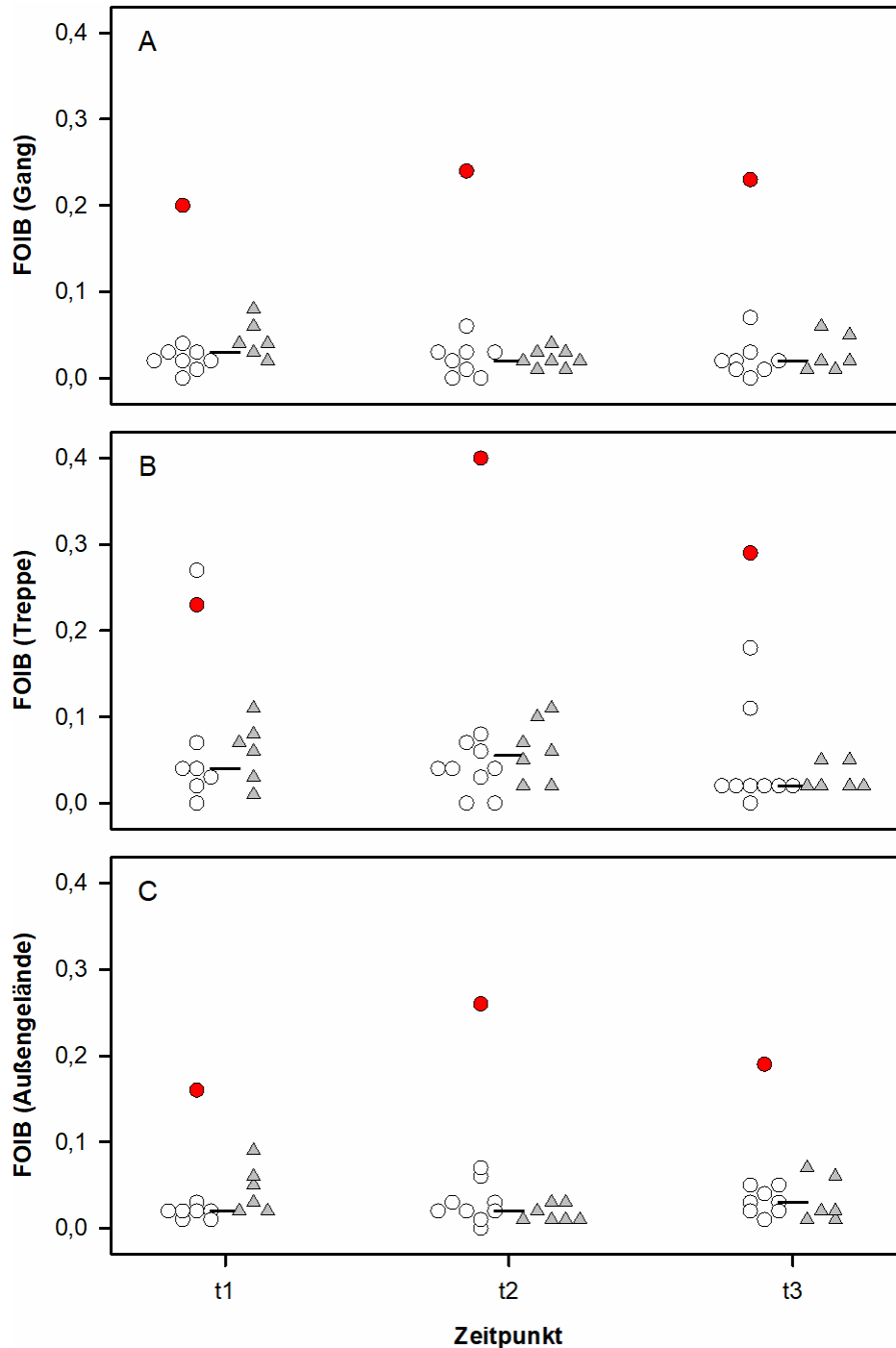


Abb. 12 A-C: Darstellung von Gangasymmetrien auf unterschiedlichen Teststrecken relativ zum Verlauf von t₁ bis t₃

○ = MRT⁺ -Gruppe, △ = MRT⁻ -Gruppe. Es lagen in der MRT⁺ -Gruppe bzw. MRT⁻ -Gruppe zu den Zeitpunkten t₁ n=9/n=6, t₂ n=9/n=7, t₃ n=9/n=6 vollständige Untersuchungen vor. Zusätzliche einzelne Datensätze: MRT⁺ -Gruppe: t₂ (Gang), t₃ (Treppe), MRT⁻ -Gruppe: t₂ (Gang) Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt. ● = Patientin mit bereits vorbestehend deutlichen Gangasymmetrien.

4.6 Charakterisierung der Knochenqualität

4.6.1 Ergebnisse der Knochendichtemessung mit Hilfe der Pulsecho-graphie

Die Ergebnisse der gesunden Seite sind in Abbildung 13 dargestellt. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zur frakturierten Seite. Insgesamt lag die mediane Knochendichte zumeist im Bereich der Osteopenie, wobei die MRT⁻-Gruppe durchweg eine im Median bessere Knochendichte als die MRT⁺-Gruppe aufwies, zum Zeitpunkt t₃ war dieser Unterschied signifikant ($p < 0,01$ im Mann-Whitney-U-Test).

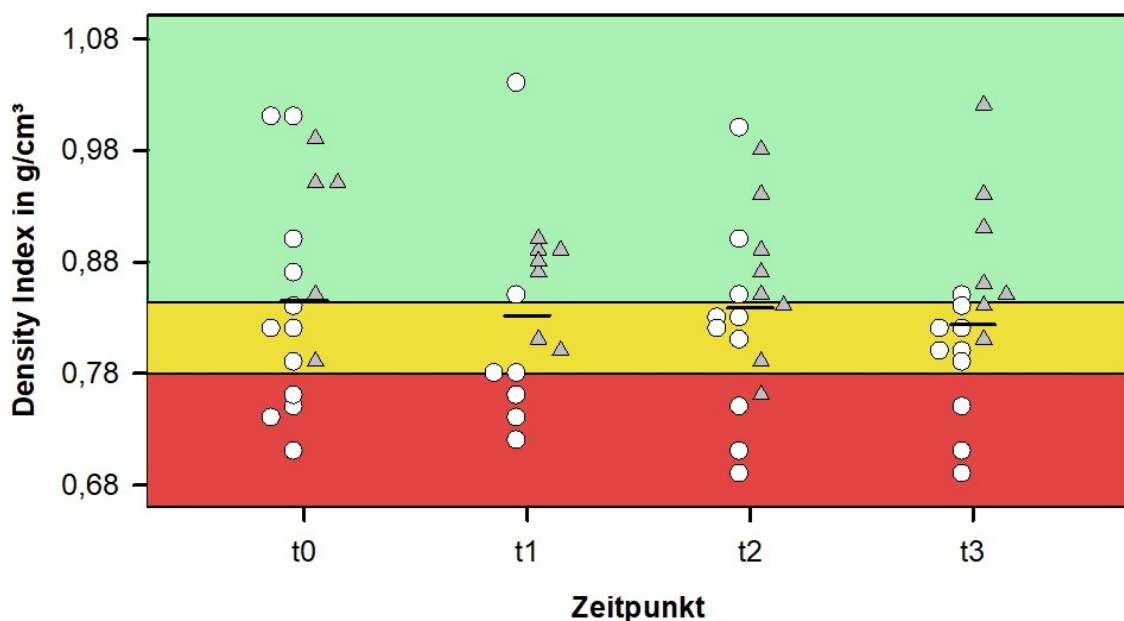


Abb. 13: Darstellung der pulsechographisch ermittelten Knochendichte der nicht frakturierten Seite relativ zum Verlauf von t₀ bis t₃

○ = MRT⁺ -Gruppe, ▲ = MRT⁻ -Gruppe, roter Bereich = Osteoporose, gelber Bereich = Osteopenie, grüner Bereich = normale Knochendichte. Es lagen in der MRT⁺ -Gruppe bzw. MRT⁻ -Gruppe zum Zeitpunkt t₀ n=12/n=5, t₁ n=7/n=7, t₂ n=10/n=8, t₃ n=10/n=7 Untersuchungen vor. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

4.6.2 Ergebnisse der quantitativen Bestimmung von Markern des Knochenstoffwechsels

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt. Für BAP wurden an t_0 niedrigere Werte als zu den Zeitpunkten t_1 - t_3 gemessen. Bei TRAP5b unterschieden sich die zwischen t_0 und t_3 gemessenen Konzentrationen kaum. Sclerostin zeigte zwischen t_0 und t_2 konstante Konzentrationen, welche zu t_3 signifikant abfielen. Bei FGF23 kam es zu einem leichten Anstieg der Konzentrationen zwischen t_0 und t_3 . Auch bei α -Klotho zeigte sich zunächst ein Anstieg zwischen t_0 und t_1 , zwischen t_2 und t_3 fiel die Konzentration jedoch leicht ab. Signifikante Unterschiede zwischen der MRT^+ - und MRT^- -Gruppe zeigten sich für FGF-23 und α -Klotho zum Zeitpunkt t_1 sowie für TRAP5b zum Zeitpunkt t_2 .

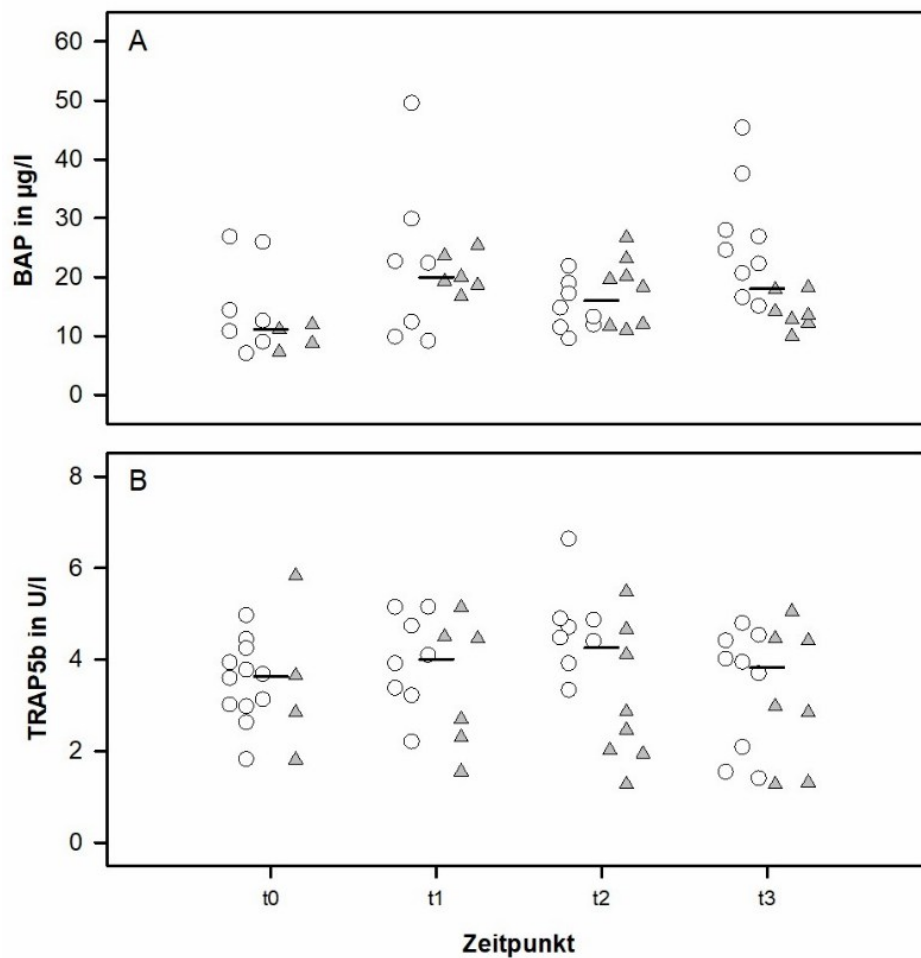


Abb. 14 A, B: Darstellung der Konzentrationen von BAP und TRAP5b relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3

○ = MRT^+ -Gruppe, △ = MRT^- -Gruppe, * = $p < 0,05$ signifikant im Wilcoxon-Test. Vorliegende Proben in MRT^+ -Gruppe bzw. MRT^- -Gruppe: BAP: t_0 $n=7/n=4$, t_1 $n=7/n=6$, t_2 $n=8/n=8$, t_3 $n=9/n=7$, TRAP5b: t_0 $n=12/n=4$, t_1 $n=8/n=6$, t_2 $n=8/n=8$, t_3 $n=9/n=7$. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

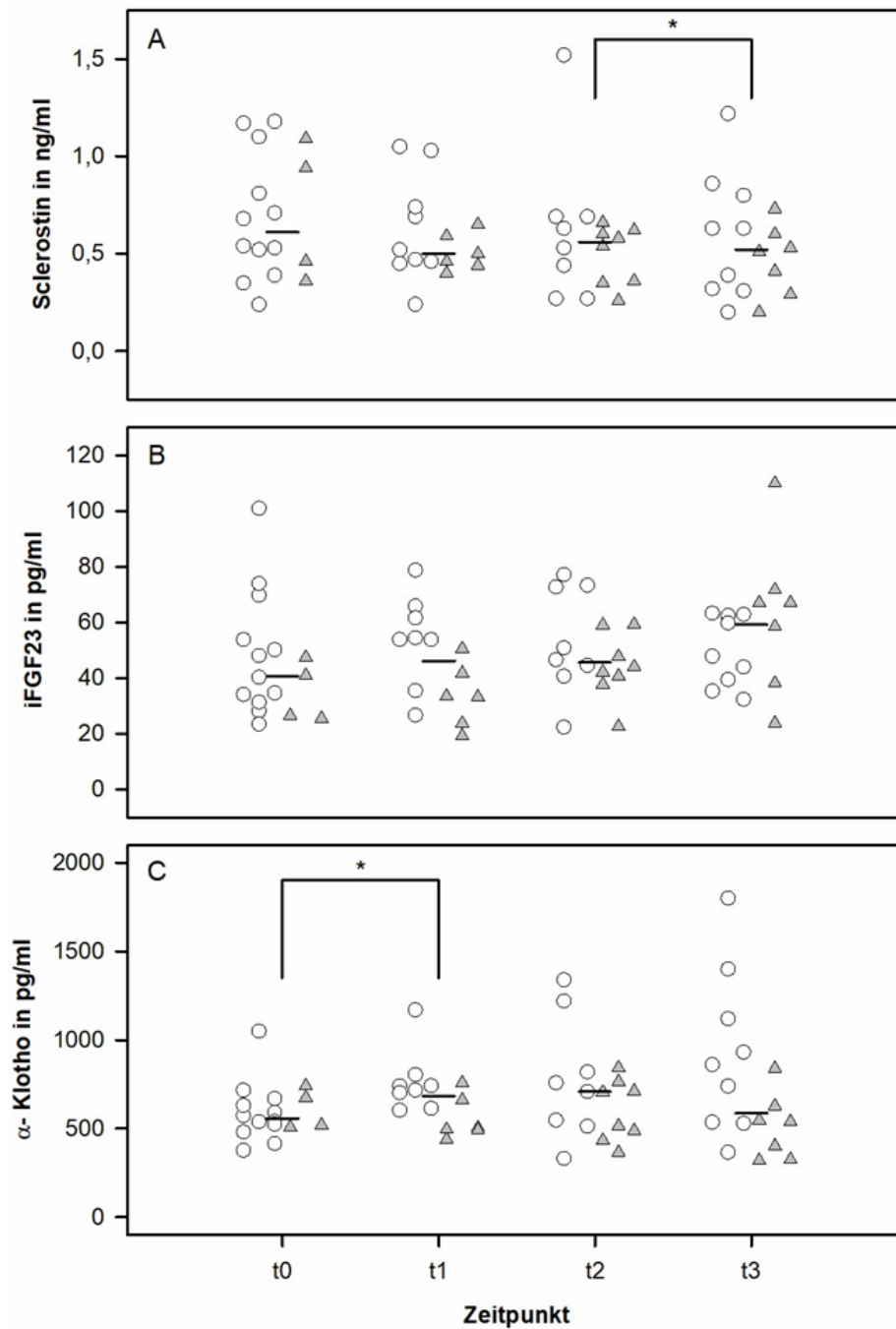


Abb. 15 A-C: Darstellung der Konzentrationen von Sclerostin, iFGF23 und α -Klotho relativ zum Verlauf von t_0 bis t_3

○ = MRT^+ -Gruppe, ▲ = MRT^- -Gruppe, * = $p < 0,05$ signifikant im Wilcoxon-Test. Vorliegende Proben in MRT^+ -Gruppe bzw. MRT^- -Gruppe: Sclerostin: t_0 $n=12/n=4$, t_1 $n=9/n=6$, t_2 $n=8/n=8$, t_3 $n=9/n=7$, iFGF23: t_0 $n=12/n=4$, t_1 $n=8/n=6$, t_2 $n=8/n=8$, t_3 $n=9/n=7$, α -Klotho: t_0 $n=12/n=4$, t_1 $n=8/n=6$, t_2 $n=8/n=8$, t_3 $n=9/n=7$. Die Mediane sind unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit dargestellt.

5 Diskussion

Das Risiko für Frakturen des oberen Sprunggelenks nimmt mit steigendem Alter zu. Eine solche Fraktur kann das Risiko für dauerhafte Mobilitätseinschränkung, einer vermehrten Sturzgefährdung sowie für nachfolgende Frakturen erhöhen. Daraus resultieren deutliche Auswirkungen auf die gesundheitsbezogene Lebensqualität der Betroffenen. Eine zusätzliche MRT-Diagnostik kann eine mögliche Weichteilbeteiligung mit hoher Sensitivität und Spezifität darstellen und könnte so zu einer Verbesserung des funktionellen Outcomes führen.

Bisherige Studien an älteren Patienten mit OSG-Fraktur waren auf die Epidemiologie, das Auftreten als osteoporotische Fraktur und die Therapie fokussiert (Elsoe et al. 2018; Kannus et al. 2002; So et al. 2020; Therdyothin et al. 2020; van Halsema et al. 2022). Im Gegensatz dazu befasst sich diese Studie erstmals mit einer der Risikogruppe „älterer Patienten“ angepassten Diagnostik. Es wurden 22 Patienten in einem Alter von ≥ 65 Jahren mit OSG-Fraktur prospektiv rekrutiert und 12 dieser Patienten erhielten eine zusätzlichen MRT-Diagnostik. Das funktionelle Outcome wurde anhand einer präoperativen Untersuchung sowie 3 Nachuntersuchungen 6, 12 und 18 Monate postoperativ erfasst.

OSG-Frakturen waren in den meisten Fällen auch nach 18 Monaten mit persistierenden Einschränkungen verbunden. Subjektiv bestanden Schmerzen und Mobilitätseinschränkungen. Zudem konnten Gangasymmetrien dargestellt werden. Ein besseres Outcome bei Patienten mit präoperativer MRT-Diagnostik konnte nicht nachgewiesen werden.

5.1 Die OSG-Fraktur als Fragilitätsfraktur des älteren Menschen

An der vorliegenden Studie nahmen überwiegend weibliche Patienten teil. Mehrere epidemiologische Studien beschreiben mit steigendem Alter eine höhere Inzidenz weiblicher Patienten und die Autoren empfehlen, die OSG-Fraktur als Fragilitätsfraktur einzustufen (Court-Brown et al. 1998; Kannus et al. 2002; Elsoe et al. 2018). Für diese Zuordnung sprechen auch in Übereinstimmung mit der Studie von Lee et al (Lee et al. 2013) sowohl die häufig komplexen Frakturmuster als auch, dass der berichtete Unfallmechanismus einem Niedrigrasanztrauma entspricht. Lee et al fanden in ihrer Studie einen steigenden Anteil an OSG-Frakturen durch Niedrigrasanztraumata mit zunehmendem Alter, ältere Patienten wiesen zudem komplexere Frakturmuster auf.

Die Autoren zweier Metaanalysen untersuchten in den letzten Jahren den Zusammenhang zwischen Knochendichte und OSG-Fraktur (So et al. 2020; Therdyothin et al. 2020). So et al beschreiben einen signifikanten Zusammenhang zwischen OSG-Frakturen beim älteren Menschen und einer reduzierten Knochendichte am Femurhals, allerdings schwächer ausgeprägt als bei anderen osteoporosebedingten Frakturen (So et al. 2020). Therdyothin et al kommen hingegen zu dem Schluss, dass eine Mehrzahl von Studien keine eindeutige Assoziation zwischen OSG-Fraktur und Knochendichte zeigen. Jedoch würden mikroarchitektonische Veränderungen auftreten und ein erhöhtes Risiko für nachfolgende Frakturen bestehen, sodass es sich bei der OSG-Fraktur um eine frühe Manifestation der Osteoporose handeln könnte (Therdyothin et al. 2020). In beiden Studien wurde die Knochendichte durch das DXA-Verfahren bestimmt. Dieses ist das empfohlene Standardverfahren zur Knochendichtemessung (DVO e.V. 2023). In dieser Studie erfolgte die Bestimmung der Knochendichte hingegen durch pulsechografische Messung (Bindex®) an der proximalen Tibia. Für dieses Verfahren wurde eine Sensitivität und Spezifität von ca. 80% angegeben (Schousboe et al. 2017).

Mit der quantitativen Pulsechographie zeigte sich im gesamten Untersuchungszeitraum eine deutlich bessere Knochendichte der MRT⁻-Gruppe. Insgesamt wiesen mindestens 50% der Patienten zu jedem Untersuchungszeitpunkt eine reduzierte Knochendichte auf (Osteoporose wahrscheinlich oder weitere Abklärung nötig). Weitere Untersuchungen wären nötig, um eine Aussage treffen zu können, inwiefern diese Ergebnisse von denen gesunder Probanden abweichen. Insbesondere in der MRT⁻-Gruppe kam es zu einer Abnahme des Density Index im Verlauf. Dies könnte auf einen Verlust von Knochendichte durch fortbestehende Mobilitätseinschränkungen hinweisen.

Dabei ist zu beachten, dass ab einem BMI über 30 kg/m² die Aussagekraft des Density Index abnimmt (Schousboe et al. 2017), ein erhöhter BMI aber gleichzeitig auch ein wichtiger Risikofaktor für das Auftreten von OSG-Frakturen ist (Greenfield und Eastell 2001).

5.2 Outcome nach OSG-Fraktur in Relation zur präoperativen Bildgebung

Das Outcome nach OSG-Fraktur wird in klinischen Studien unterschiedlich erfasst. Studiendesigns variieren von röntgenbasierten Bildgebungen und klinischen Tests zur Erfassung von Struktur und Funktion des Sprunggelenks bis hin zu einer Vielzahl von Fragebögen zur Erfassung des subjektiven Outcome (Patient reported outcome measures; PROM) (McKeown et al. 2019; Pearson et al. 2022). Um die subjektive Patientenwahrnehmung ebenso wie eine objektive Darstellung des Outcome zu ermöglichen, wurde für diese Studie eine Kombination aus Fragebogen, klinischen Untersuchungen und Tests gewählt.

MRT⁺- und MRT⁻-Gruppe wiesen schon zum Zeitpunkt des Studieneinschlusses deutliche Unterschiede auf. Teilnehmer der MRT⁻-Gruppe waren deutlich jünger, seltener relevant vorerkrankt und wiesen eine signifikant bessere Knochendichte auf. Die weiblichen Studienteilnehmer hatten zudem einen höheren BMI. Somit ist von einer eingeschränkten Vergleichbarkeit der beiden Gruppen auszugehen. Da keine Randomisierung zwischen den Gruppen durchgeführt wurde, kann ein Bias nicht ausgeschlossen werden. Beispielsweise wurden Patienten, die notfallmäßig eine Fixateur-Externe-Anlage benötigten und daraufhin keine MRT-Bildgebung mehr erhalten konnten, häufiger der MRT⁻-Gruppe zugeordnet.

Betrachtet man die gesamte Studienpopulation unabhängig von der präoperativen Bildgebung, legen die Ergebnisse nahe, dass bei der Mehrzahl der Patienten die Funktion des OSG nur inkomplett wiederhergestellt wurde. Auffallend ist zudem, dass es zwischen 6 und 18 Monaten nach der Fraktur nur noch zu einer geringen Verbesserung des funktionellen Outcomes kam. Auch die Ergebnisse der Ganganalyse sprechen für diese Interpretation. In der klinischen Untersuchung zeigten sich Einschränkungen der Beweglichkeit in Inversion / Eversion sowie Dorsalextension / Plantarflexion. Auch diese Befunde blieben im gesamten Untersuchungszeitraum konstant. Zudem lag im gesamten Beobachtungszeitraum ein vergrößerter Knöchelumfang im Vergleich zur Gegenseite vor. Dies steht in Einklang mit publizierten Daten, denen zufolge mindestens 60% der Patienten mit OSG-Fraktur in einem Alter von ≥ 65 Jahren nach einem Jahr noch über Schmerz, Schwellung, Probleme beim Treppensteigen und eine eingeschränkte Alltagsaktivität klagen (Nilsson et al. 2007). Beckenkamp et al. beschreiben ebenfalls eine nur inkomplette Wiederherstellung der körperlichen Funktion nach 2 Jahren, ca. 80% der

vorherigen Funktion würden der Metaanalyse zufolge innerhalb der ersten 6 Monate wiedererlangt werden (Beckenkamp et al. 2014).

Die Daten des EFAS-Scores ergeben, dass vor der Fraktur im Patientenkollektiv keine Beschwerden an Fuß oder Sprunggelenk bestanden. 6 Monate postoperativ wurden ca. 70% der maximalen Punktzahl erreicht, ohne dass es im weiteren Verlauf zu einer signifikanten Besserung kam. Die Beurteilbarkeit des EFAS-Sport-Scores war nur eingeschränkt möglich, da viele Patienten schon vor der Fraktur keinen Sport mehr ausübten oder dabei Beschwerden bestanden. Auch wurden Übungen wie Rennen und Springen aufgrund des Alters oft nicht mehr ausgeführt. Neben dem EFAS-Score existiert eine Vielzahl an Fragebögen zur Erfassung des Outcomes bei Problemen am Sprunggelenk. Allerdings sind diese in der Regel in der englischen Sprache verfasst. Aus diesem Grund wurde sich in der vorliegenden Studie für den EFAS-Score entschieden, einen relativ neuen Fragebogen, der auch in der deutschen Sprache validiert ist. Aktuell existieren keine Studien, die den EFAS-Score zur Messung des subjektiven Outcomes nach OSG-Fraktur verwendeten.

Der EFAS-Score korrelierte positiv mit der Griffkraft. Diese ist wiederum ein Indikator für Muskelkraft (Porto et al. 2019). Patienten, die allgemein über eine bessere körperliche Kraft verfügen, erreichten auch ein besseres subjektives Outcome. Dies erscheint naheliegend, da eine niedrige Griffkraft mit einer erhöhten Sterblichkeit, mehr postoperativen Komplikationen, einer längeren Liegezeit und mehr persistierenden körperlichen Einschränkungen beim älteren Menschen assoziiert ist (Bohannon 2008).

Der TUG-Test wird von der S1 Leitlinie Geriatrisches Assessment der Stufe 2 als einfach durchführbarer Mobilitätstest zur Beurteilung geriatrischer Patienten empfohlen (Krupp 2022). Er dient zudem zur Risikoabschätzung der Sturzgefahr geriatrischer Patienten (Lusardi et al. 2017). Trotz der Persistenz von Beschwerden und Mobilitätseinschränkungen erreichten die meisten Patienten gute Ergebnisse im TUG-Test.

In keiner der Untersuchungen ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Patienten, die ein MRT erhielten und denen, bei den ausschließlich eine röntgenbasierte Bildgebung erfolgte. Auch gab es in keiner der beiden Gruppen Komplikationen, die eine Re-Operation aufgrund von Instabilitäten nötig gemacht hätten. Es ist daher wahrscheinlich, dass eine bei allen Patienten ≥ 65 Jahren

durchgeführte zusätzliche präoperative MRT-Bildgebung das funktionelle Ergebnis nach OSG-Fraktur nicht positiv beeinflusst.

Nichtsdestotrotz ließen sich in der MRT bei beinahe allen Patienten Bänderrupturen darstellen. Nur eine Patientin mit Typ A-Fraktur wies keine Bandverletzung auf, in diesem Fall erfolgte im OP-Bericht ein Verweis auf das unauffällige MRT.

Verletzungen des lateralen Kollateralbandes traten häufig auf. Erwartungsgemäß war das Lig. fibulotalare ant. als schwächstes Band des Sprunggelenks am häufigsten von Rupturen betroffen. Deutlich seltener konnte eine Ruptur im Bereich des Deltabandes nachgewiesen werden. Auffällig war, dass die Beurteilbarkeit des Deltabandes häufiger eingeschränkt war als die der andern Bandstrukturen. Beide Kollateralbänder wurden intraoperativ nicht adressiert. Syndesmosenverletzungen waren sehr häufig, allerdings trat nur bei einem Patienten (mit trimalleolärer Typ C-Fraktur) eine Ruptur aller Bandstrukturen der Syndesmose auf. In drei Fällen wurde eine Stellschraube zur stabilen Fixierung verwendet, in einem Fall erfolgte die Fixierung eines knöchernen Ausrisses der vorderen Syndesmose mit einem Faden. In den anderen Fällen war die Syndesmose nach anatomischer Reposition und Osteosynthese der Fraktur stabil.

Die Ergebnisse der MRT-Diagnostik machen deutlich, dass Verletzungen der Bandstrukturen bei älteren Patienten mit OSG-Fraktur sehr häufig sind. Bei entsprechender therapeutischer Konsequenz sollte somit eine MRT als Zusatzdiagnostik erwogen werden.

5.3 Grenzen der vorliegenden Arbeit

Die Aussagen der vorliegenden Studie sind durch die ausgesprochen kleine Studienpopulation beschränkt und zudem konnten nicht immer auch alle Untersuchungen zum geplanten Zeitpunkt stattfinden. Weiterhin konnten nicht von allen Studienteilnehmern vollständige Datensätze erhoben werden. Insbesondere zu erwähnen ist an dieser Stelle der verspätete Start der Rekrutierung der MRT⁻-Gruppe, sodass in dieser nur die Hälfte der Patienten eine präoperative Untersuchung erhielten. Die Einschränkungen durch die Corona-Pandemie haben sowohl die Probandenrekrutierung als auch die Follow-Up-Untersuchungen zusätzlich erschwert. Gründe für das fehlende Interesse waren unter anderem der durch das umfangreiche Studienprotokoll bedingte hohe Zeitaufwand sowie auch die Sorge vor der aufgrund von Immobilität erschwerten Anfahrt.

Auch erfolgte keine Randomisierung zwischen der MRT⁺- und MRT⁻-Gruppe. Stattdessen war die Rekrutierung in die MRT⁺-Gruppe durch die Realität des Klinikalltags wie z.B. die Durchführung der präoperativen Anmeldung zur MRT-Diagnostik und die zeitnahe Verfügbarkeit limitiert. Auch Kontraindikationen, insb. durch die notfallmäßige Anlage eines Fixateur-Externe, spielten eine Rolle.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtpopulation kann zudem dadurch eingeschränkt sein, dass insbesondere im Patientenkollektiv ≥ 65 Jahren bereits häufig Mobilitätseinschränkungen und Vorerkrankungen bestehen und eine Studienteilnahme aus diesen Gründen häufig abgelehnt wurde. Ein Bias ist somit nicht auszuschließen. Auch mussten häufig Patienten aufgrund einer Demenz von einer Teilnahme ausgeschlossen werden. Dies mag dazu führen, dass das Studienkollektiv bessere Ergebnisse als der Durchschnitt der Patienten dieser Altersgruppe erzielt.

Ein weiterer Schwachpunkt liegt darin, dass aus den Operationsberichten nur wenige Informationen darüber zu entnehmen waren, ob das Vorliegen einer MRT durch den Operateur zur Kenntnis genommen wurde und inwiefern dies sein therapeutisches Handeln beeinflusst hat. Es ist sicherlich empfehlenswert, eine strukturierte Beschreibung der Versorgung von Weichteilstrukturen in den Operationsbericht aufzunehmen.

5.4 Fazit und Ausblick

Unter den Patienten mit OSG-Fraktur stellen ältere Menschen (≥ 65 Jahre) eine besondere Risikogruppe dar. Das Überwiegen weiblicher Patienten, Vorliegen komplexer Frakturmuster nach Niedrigrasanztrauma sowie ein reduzierter Density Index in der Pulsechografie geben Hinweise auf das Vorliegen einer osteoporotischen Fragilitätsfraktur.

Auch 18 Monate nach OSG-Fraktur bestanden noch deutliche Beschwerden und Funktionseinschränkungen, die zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Lebensqualität führen können. Obwohl bei beinahe allen Patienten frakturbegleitende Bänderverletzungen im MRT nachgewiesen werden konnten, ließ sich kein besseres Outcome bei Patienten mit präoperativer MRT-Diagnostik nachweisen. Weitere prospektive Studien mit größerem Patientenkollektiv, Randomisierung von MRT⁺- und MRT⁻-Gruppe und strukturierter Dokumentation der intraoperativen Weichteilversorgung könnten von Nutzen sein.

6 Zusammenfassung

Ältere Menschen (≥ 65 Jahre) machen einen zunehmenden Anteil der Patienten mit OSG-Fraktur aus. Durch die im Alter abnehmende Knochendichte steigt das Risiko einer Fraktur nach Niedriggradtrauma. Auch trägt eine reduzierte Knochendichte zu der Entstehung komplexerer Frakturmuster bei. Begleitende Verletzungen ligamentärer Strukturen sind häufig und werden mit einer röntgenbasierten Diagnostik nur unzureichend detektiert. Dies erhöht das Risiko einer chronischen Instabilität des Sprunggelenks, was in der Folge Mobilitätseinschränkungen, Stürze und daraus resultierend weitere Frakturen nach sich ziehen kann.

Ziel der vorliegenden Studie war es, zu evaluieren, ob eine präoperativ durchgeführte MRT zur Verbesserung des funktionellen Outcomes der oben genannten Risikogruppe beiträgt. Darum wurden 22 Patienten in einem Alter von ≥ 65 Jahren prospektiv rekrutiert und einmalig während ihres akutstationären Aufenthaltes sowie im Verlauf von 1,5 Jahren alle 6 Monate im Hinblick auf ihr funktionelles Outcome untersucht. Bei 12 Patienten konnte eine präoperative MRT-Diagnostik durchgeführt werden, diese bildeten die MRT⁺-Gruppe, die restlichen Patienten wurden in die MRT⁻-Gruppe eingeteilt. Die Befundung der MRT erfolgte nach einem für die Studie angefertigten Befundungsschema durch einen erfahrenen Radiologen. Bei 11 von 12 Patienten ließen sich Bandrupturen nachweisen.

Die Knochendichte wurde mit quantitativer Ultraschallmessung ermittelt. Bei einem Teil der Studienteilnehmer lag eine reduzierte Knochendichte vor. Der Zusammenhang der OSG-Fraktur mit einer reduzierten Knochendichte bedarf weiterer Forschung.

In der klinischen Untersuchung ließen sich zu allen Nachuntersuchungszeitpunkten eine reduzierte Range of Motion und ein erhöhter Knöchelumfang der frakturierten Seite im Vergleich zur Gegenseite darstellen. Auch nach 1,5 Jahren bestanden noch Gangasymmetrien. Trotz der persistierenden Gangveränderungen erreichten die meisten Patienten gute Ergebnisse im Timed „Up and Go“ Test. Die MRT⁺-Gruppe zeigte in keiner der Untersuchungen ein signifikant besseres Outcome als die MRT⁻-Gruppe.

Zur Evaluation des subjektiven Outcome wurde der EFAS-Fragebogen von den Teilnehmern ausgefüllt. Vor der Fraktur bestanden kaum Einschränkungen. 6 Monate postoperativ wurden in beiden Gruppen ca. 70 % der maximalen

Punktzahl erreicht, ohne dass es im Verlauf der weiteren Nachuntersuchungen zu einer signifikanten Besserung der Beschwerden kam. Somit lässt sich schließen, dass ältere Patienten nach OSG-Fraktur auch nach 1,5 Jahren noch von Schmerzen und Mobilitätseinschränkungen betroffen sind.

Die vorliegende Studie untersuchte erstmals den Nutzen einer präoperativen MRT-Bildgebung für Patienten ≥ 65 Jahren mit OSG-Fraktur. Es konnte kein Zusammenhang der zusätzlichen MRT-Bildgebung mit einem besseren funktionellen Outcome gefunden werden. Aufgrund des kleinen Studienkollektivs sollten diese Ergebnisse in größeren Studien verifiziert werden. Auch sollte eine Randomisierung von MRT⁺- und MRT⁻-Gruppe erfolgen.

7 Thesen

Obere Sprunggelenksfrakturen gewinnen in der älteren Bevölkerung zunehmend an epidemiologischer Relevanz. Durch die im Alter abnehmende Knochendichte treten häufig komplexere Frakturmuster auf, welche mit langfristigen Mobilitätseinschränkungen assoziiert sind. Die Wiederherstellung der Sprunggelenksstabilität spielt deshalb eine wesentliche Rolle in der operativen Versorgung. In dieser Arbeit wurde erstmals der Nutzen einer zusätzlichen präoperativen MRT-Diagnostik auf das funktionelle Outcome nach OSG-Fraktur bei Patienten ≥ 65 Jahren untersucht.

1. Beinahe alle Patienten im Alter von ≥ 65 Jahren mit OSG-Fraktur weisen auch Bandverletzungen auf.
2. Patienten ≥ 65 Jahre mit OSG-Fraktur weisen eine für osteoporotische Frakturen typische Geschlechterverteilung sowie eine in der quantitativen Ultraschallmessung reduzierte Knochendichte auf.
3. Die ergänzende MRT-Diagnostik wirkt sich bei Patienten ≥ 65 Jahren nicht auf das funktionelle Outcome nach OSG-Fraktur aus.
4. Die Mehrzahl der Patienten im Alter von ≥ 65 Jahren erreicht nur eine inkomplette Wiederherstellung der körperlichen Funktionsfähigkeit nach OSG-Fraktur.
5. Zwischen 6 und 18 Monaten postoperativ findet keine wesentliche Verbesserung des subjektiven Outcome nach OSG-Fraktur mehr statt.
6. Die Griffkraft, als Indikator für die allgemeine körperliche Kraft, korreliert positiv mit dem subjektiven Outcome nach OSG-Fraktur.
7. Trotz der Persistenz von Beschwerden und Mobilitätseinschränkungen erreichen ältere Patienten nach OSG-Fraktur gute Ergebnisse im Timed "Up and Go"-Test.

8 Anhang

8.1 EFAS – Score

EUROPEAN FOOT AND ANKLE SOCIETY (EFAS)

www.efas.co

EFAS Score

Auf der folgenden Seite finden Sie 6 Fragen zu Ihren Problemen am Fuß und/oder Sprunggelenk.

Bitte beantworten Sie alle Fragen so, dass Sie Ihre Situation innerhalb der letzten Woche am passendsten beschreiben. Jede Frage hat 5 Antwortmöglichkeiten, d.h. eine 5-Punkte-Skala mit einer Beschreibung der Antworten bzw. Endpunkte.

Falls eine Frage für Sie nicht zutrifft, kreuzen Sie bitte "n.z." an und beantworten die Frage nicht.

FRAGEN

Nr.	Frage	Antwort
1 n. z.	Haben Sie in Ruhe Schmerzen im Fuß / Sprunggelenk?	Immer 0 1 2 3 Nie 4
2 n. z.	Wie weit können Sie gehen bis Sie Schmerzen am Fuß / Sprunggelenk bekommen?	Gehen unmöglich Keine Einschränkung 0 1 2 3 4
3 n.z.	Wie stark hat sich Ihr Gang (d.h. die Art wie Sie gehen) wegen Problemen am Fuß / Sprunggelenk verändert?	Extreme Veränderung Keine Veränderung 0 1 2 3 4
4 n.z.	Haben Sie Schwierigkeiten beim Gehen auf unebenem Untergrund?	Immer 0 1 2 3 Nie 4

5 n.z.	Haben Sie Schmerzen im Fuß / Sprunggelenk beim Gehen?	Immer 0	1	2	3	Nie 4
6 n.z.	Wie oft haben Sie Schmerzen im Fuß / Sprunggelenk während	Immer 0	1	2	3	Nie 4

SPORTFRAGEN

Bitte beantworten Sie diese Fragen nur wenn Sie regelmäßig Sport treiben. Bei Fragen, die für Ihre sportliche Betätigung nicht zutreffen, kreuzen Sie bitte n.z. an und beantworten die Frage nicht.

Nr.	Frage	Antwort				
S1 n.z.	Können Sie rennen/ schnell laufen?	Unmöglich 0	1	Keine Einschränkung 2 3 4		
S2 n.z.	Können Sie joggen/ langsam laufen?	Unmöglich 0	1	Keine Einschränkung 2 3 4		
S3 n.z.	Haben Sie Probleme bei der Landung nach einem Sprung?	Unmöglich 0	1	Keine Einschränkung 2 3 4		
S4 n.z.	Können Sie Ihren Sport mit Ihrer üblichen Technik ausüben?	Unmöglich 0	1	Keine Einschränkung 2 3 4		

Sie haben nun den Fragenbogen vollständig ausgefüllt. Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. med. Thomas Mittlmeier für die Überlassung des Themas dieser Dissertation.

Prof. Dr. rer. nat. D.-C. Fischer möchte ich für die intensive Betreuung dieser Arbeit danken. Durch Ihre unermüdliche Unterstützung und konstruktiven Rat haben Sie wesentlich zum Gelingen dieser Studie beigetragen.

Dr. med. T. Beyer aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie danke ich für die für bildgebende Diagnostik, insbesondere für die Befundung der MRT-Bilder.

Anja Rahn aus der AG Experimentelle Pädiatrie möchte ich für ihre sachkundige Unterstützung im Labor danken.

Clara Salimo danke ich für die Einarbeitung in die Studienabläufe und die gute Zusammenarbeit bei der Datenerhebung.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei den Probanden bedanken, die freiwillig an der Studie teilnahmen, was mit einem großen zeitlichen Aufwand verbunden war. Ohne sie wäre diese Studie nicht möglich gewesen.

Meinen Freunden, meinem Partner und insbesondere meinen Eltern danke ich für all ihre aufbauenden Worte und die Unterstützung während der Arbeit an meiner Promotion und darüber hinaus.

10 Curriculum Vitae

Persönliche Daten:

Name	Marie Wölper
Geburtstag	30.10.1998
Geburtsort	Köln
Adresse	Voßstraße 21, 18059 Rostock

Akademische Laufbahn:

2017	Schulabschluss Allgemeine Hochschulreife, Albert-Einstein-Gymnasium, Buchholz i.d.N.
2017-2023	Studium der Humanmedizin an der Universität Rostock – Physikum 2019 – Schriftliches Staatsexamen 2022 – Mündliches Staatsexamen 2023

Berufserfahrung:

2021-2022	Studentische Hilfskraft im Impfzentrum Rostock
2022-2023	Praktisches Jahr der Humanmedizin
2024 - laufend	Ärztin in Weiterbildung zur Fachärztin für Frauenheilkunde und Geburtshilfe, Sana-HANSE-Klinikum Wismar

Promotion:

2020-2025	Anfertigung der vorliegenden Dissertation in der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsmedizin Rostock
-----------	--

Rostock, 20.02.2025

Marie Wölper

11 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Marie Wölper, geboren am 30.10.1998 in Köln, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

„Ergebnisse einer prospektiven longitudinalen Studie zu Komplikationen und funktionellem Outcome nach osteoporotischer Fraktur des oberen Sprunggelenks“

selbstständig, ohne Hilfe Dritter und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Die Dissertation wurde bisher an keiner anderen Fakultät vorgelegt.

Rostock, 20.02.2025

Marie Wölper

12 Literaturverzeichnis

- AO/OTA (2018): Fracture and dislocation compendium. *J Orthop Trauma* Vol. 32, Nr. 1 Supplement: 65-70.
- Balani S, Perwad F (2019): Fibroblast growth factor 23 and phosphate homeostasis. *Curr Opin Nephrol Hypertens* 28 (5): 465–473.
- Barnsley J, Buckland G, Chan P E, Ong A, Ramos A S, Baxter M, Laskou F, Dennison E M, Cooper C, Patel Harnish P (2021): Pathophysiology and treatment of osteoporosis: challenges for clinical practice in older people. *Aging Clin Exp Res* 33 (4): 759–773.
- Beckenkamp P R, Lin C-W C, Chagpar S, Herbert R D, van der Ploeg H P, Moseley, A M (2014): Prognosis of physical function following ankle fracture: a systematic review with meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther* 44 (11): 841-51, B2.
- Bian A, Xing C, Hu M C (2014): Alpha Klotho and phosphate homeostasis. *J Endocrinol Invest* 37 (11): 1121–1126.
- Bohannon R W (2008): Hand-grip dynamometry predicts future outcomes in aging adults. *J Geriatr Phys Ther* (2001) 31 (1): 3–10.
- Bonewald L F (2011): The amazing osteocyte. *J Bone Miner Res* 26 (2): 229–238.
- Boyce B F, Rosenberg E, de Papp A E, Le Duong T (2012): The osteoclast, bone remodelling and treatment of metabolic bone disease. *Eur J Clin Invest* 42 (12): 1332–1341.
- Buyukkuscu M O, Basilgan S, Mollaomeroglu A, Misir A, Basar H (2022): Splinting vs temporary external fixation in the initial treatment of ankle fracture-dislocations. *Foot Ankle Surg* 28 (2): 235–239.
- Castro M D (2002): Ankle biomechanics. *Foot Ankle Clin* 7 (4): S. 679–693.
- Chun, D, Cho J-H, Min T-H, Park S Y, Kim K-H, Kim J H, Won S H (2019): Diagnostic Accuracy of Radiologic Methods for Ankle Syndesmosis Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Clin Med* 8 (7): 968
- Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis (1993). *Am J Med* 94 (6): 646–650.

- Court-Brown C M, McBirnie J, Wilson G (1998): Adult ankle fractures--an increasing problem? *Acta Orthop Scand* 69 (1): 43–47.
- Court-Brown C M, Caesar B (2006): Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury* 37 (8): 691–697.
- Delaisse J-M (2014): The reversal phase of the bone-remodeling cycle: cellular prerequisites for coupling resorption and formation. In: *Bonekey Rep* 3: 561.
- DVO e.V. (2023): Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose bei postmenopausalen Frauen und bei Männern ab dem 50. Lebensjahr. *AWMF online*. https://register.awmf.org/assets/guidelines/183-001I_S3_Prophylaxe-Diagnostik-Therapie-der-Osteoporose_2023-11.pdf.
- Elsoe R, Ostgaard S E, Larsen P (2018): Population-based epidemiology of 9767 ankle fractures. *Foot Ankle Surg* 24 (1): 34–39.
- Golanó P, Vega J, de Leeuw P A J Malagelada F, Manzanares M C, Götzens V, van Dijk C N (2010): Anatomy of the ankle ligaments: a pictorial essay. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18 (5): 557–569.
- Goost H, Wimmer M D, Barg A, Kabir K, Valderrabano V, Burger C (2014): Fractures of the ankle joint: investigation and treatment options. *Dtsch Arztebl Int* 111 (21): 377–388.
- Goretti Penido M, Alon U S (2012): Phosphate homeostasis and its role in bone health. *Pediatr Nephrol* 27 (11): 2039–2048.
- Greenfield D M, Eastell R (2001): Risk factors for ankle fracture. *Osteoporos Int* 12 (2): 97–103.
- Hintermann B, Regazzoni P, Lampert C, Stutz G, Gächter A (2000): Arthroscopic findings in acute fractures of the ankle. *J Bone Joint Surg Br* 82-B (3): 345–351.
- Javed O A, Javed Q A, Ukoumunne O C, Di Mascio L (2020): Surgical versus conservative management of ankle fractures in adults: A systematic review and meta-analysis. *Foot Ankle Surg* 26 (7): 723–735.
- Juto H, Nilsson H, Morberg P (2018): Epidemiology of Adult Ankle Fractures: 1756 cases identified in Norrbotten County during 2009-2013 and classified according to AO/OTA. *BMC Musculoskelet Disord* 19 (1): 441.

- Kanis J A, Norton N, Harvey N C, Jacobson T, Johansson H, Lorentzon M, McCloskey, E V, Willers C, Borgström F (2021): SCOPE 2021: a new scorecard for osteoporosis in Europe. *Arch Osteoporos* 16 (1): 82.
- Kanis J A on behalf of the World Health Organization Scientific Group (2007): Assessment of osteoporosis at the primary health-care level. Technical Report. World Health Organization Collaborating Centre for Metabolic Bone Diseases, University of Sheffield, UK. 2007: Printed by the University of Sheffield.
- Kannus P, Palvanen M, Niemi S, Parkkari J, Järvinen M (2002): Increasing number and incidence of low-trauma ankle fractures in elderly people: Finnish statistics during 1970-2000 and projections for the future. *Bone* 31 (3): 430–433.
- Katsimbri P (2017): The biology of normal bone remodelling. *Eur J Cancer Care* 26 (6): e12740.
- Krupp S für die AG Assessment der Deutschen Gesellschaft für Geriatrie e. V. (2022): S1-Leitlinie Geriatrisches Assessment der Stufe 2, Living Guideline (Version 11.07.2022). https://register.awmf.org/assets/guidelines/084-002LGI_S1_Geriatrisches-Assessment-Stufe_2_2022-10.pdf.
- Lee K M, Chung C Y, Kwon S S, Won S H, Lee S Y, Chung M K, Park M S (2013): Ankle fractures have features of an osteoporotic fracture. *Osteoporos Int* 24 (11): 2819–2825.
- Liu S, Quarles L D (2007): How fibroblast growth factor 23 works. *J Am Soc Nephrol* 18 (6): 1637–1647.
- Loubignac F (2022): Treatment of bimalleolar fractures in elderly. *Orthop Traumatol Surg Res* 108 (1S): S. 103137.
- Lusardi M M, Fritz S, Middleton A, Allison L, Wingood M, Phillips E, Criss M, Verma S, Osborne J, Chui K K (2017): Determining Risk of Falls in Community Dwelling Older Adults: A Systematic Review and Meta-analysis Using Posttest Probability. *J Geriatr Phys Ther* (2001) 40 (1): 1–36.
- Martin A, David V, Quarles L D (2012): Regulation and function of the FGF23/klotho endocrine pathways. *Physiol Rev* 92 (1): 131–155.

- Mathiowetz V, Weber K, Volland G, Kashman N (1984): Reliability and validity of grip and pinch strength evaluations. *J Hand Surg Am* 9 (2): 222–226.
- Mathiowetz V, Kashman N, Volland G, Weber K, Dowe M, Rogers S (1985): Grip and pinch strength: normative data for adults. *Arch Phys Med Rehabil* Feb; 66 (2): 69–74.
- McKeown R, Rabiou A-R, Ellard D R, Kearney R S (2019): Primary outcome measures used in interventional trials for ankle fractures: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* 20 (1): 388.
- Milner C E, Soames R W (1998): Anatomy of the collateral ligaments of the human ankle joint. *Foot Ankle Int* 19 (11): S. 757–760.
- Müller C (2004): Klinik und bildgebende Diagnostik bei der OSG-Fraktur. *Trauma Berufskrankh* 6 (S04): 393-395.
- Müller-Gerbl M (2001): Anatomie und Biomechanik des oberen Sprunggelenks. *Orthopade* 30 (1): 3–11.
- Murshed M (2018): Mechanism of Bone Mineralization. *Cold Spring Harb Perspect Med* 8 (12): a031229.
- Nilsson G, Jonsson K, Ekdahl C, Eneroth M (2007): Outcome and quality of life after surgically treated ankle fractures in patients 65 years or older. *BMC Musculoskelet Disord* 8: 127.
- Oddie, G W, Schenk G, Angel N Z, Walsh N, Guddat L W, de Jersey J et al. (2000): Structure, function, and regulation of tartrate-resistant acid phosphatase. *Bone* 27 (5): 575–584.
- Omran A, Atanasova D, Landgren F, Magnusson P (2022): Sclerostin: From Molecule to Clinical Biomarker. *Int J Mol Sci* 23 (9): 4751.
- Ovaska M T, Madanat R, Honkamaa M, Mäkinen T J (2015): Contemporary demographics and complications of patients treated for open ankle fractures. *Injury* 46 (8): S. 1650–1655.
- Pearson N A, Tutton E, Joeris A, Gwilym S E, Grant R, Keene D J, Haywood K L (2022): A systematic review of outcome reporting in clinical trials of distal tibia and ankle fractures: the need for a core outcome set. *Bone Jt Open* 3 (10): 832–840.

- Podsiadlo D, Richardson S (1991): The timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons. *J Am Geriatr Soc* 39 (2): 142–148.
- Porto J M, Nakaishi A P M, Cangussu-Oliveira L M, Freire Júnior R C, Spilla S B, de Abreu D C C (2019): Relationship between grip strength and global muscle strength in community-dwelling older people. *Arch Gerontol Geriatr* 82: 273–278.
- Raggatt L J, Partridge N C (2010): Cellular and molecular mechanisms of bone remodeling. *The J Biol Chem* 285 (33): 25103–25108.
- Rammelt S, Grass R, Biewener A, Zwipp H (2004): Anatomie, Biomechanik und Klassifikation der Sprunggelenkfrakturen. *Trauma Berufskrankh* 6 (S04): 384-392.
- Rammelt S, Manke E (2018): Syndesmosenverletzungen. *Unfallchirurg* 121 (9): 693–703.
- Rammelt S, Boszczyk A (2018): Computed Tomography in the Diagnosis and Treatment of Ankle Fractures: A Critical Analysis Review. *JBJS Rev* 6 (12), e7.
- Rammelt S, Bartoníček J (2020): Posterior Malleolar Fractures: A Critical Analysis Review. *JBJS Rev* 8 (8), e19.00207.
- Razzaque M S (2009): The FGF23-Klotho axis: endocrine regulation of phosphate homeostasis. *Nat Rev Endocrinol* 5 (11): 611–619.
- Ribeiro de Ávila V, Bento T, Gomes W, Leitão J, Fortuna de Sousa N (2018): Functional Outcomes and Quality of Life After Ankle Fracture Surgically Treated: A Systematic Review. *J Sport Rehabil* 27 (3): 274–283.
- Richter M, Agren P-H, Besse J-L, Cöster M, Kofoed H, Maffulli N, Rosenbaum D, Steultjens M, Alvarez F, Boszczyk A, Buedts K, Guelfi M, Liszka H, Louwerens J-W, Repo J P, Samaila E, Stephens M, Witteveen A G H (2018): EFAS Score - Multilingual development and validation of a patient-reported outcome measure (PROM) by the score committee of the European Foot and Ankle Society (EFAS). *Foot Ankle Surg* 24 (3): 185–204.
- Schini M, Vilaca T, Gossiel F, Salam S, Eastell R (2023): Bone Turnover Markers: Basic Biology to Clinical Applications. *Endocr Rev* 44 (3): 417–473.

- Schousboe J T, Riekkinen O, Karjalainen J (2017): Prediction of hip osteoporosis by DXA using a novel pulse-echo ultrasound device. *Osteoporos Int* 28 (1): 85–93.
- Shearman A, Sarraf K M, Thevendran G, Houlihan-Burne D (2013): Clinical assessment of adult ankle fractures. *Br J Hosp Med (Lond)* 74 (3), C37-40.
- Siddiqui J A, Partridge N C (2016): Physiological Bone Remodeling: Systemic Regulation and Growth Factor Involvement. *Physiology (Bethesda)*. 31 (3): 233-245.
- Singh R, Kamal T, Roulohamin N, Maoharan G, Ahmed B, Theobald P (2014): Ankle Fractures: A Literature Review of Current Treatment Methods. *Open J Orthop* 04 (11): 292–303.
- So E, Rushing C J, Simon J E, Goss D A, Prissel M A, Berlet G C (2020): Association Between Bone Mineral Density and Elderly Ankle Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Foot Ankle Surg* 59 (5): 1049–1057.
- Suda T, Takahashi N, Udagawa N, Jimi E, Gillespie M T, Martin T J (1999): Modulation of osteoclast differentiation and function by the new members of the tumor necrosis factor receptor and ligand families. *Endocr Rev* 20 (3): 345–357.
- Therdyothin A, Phiphophatsanee N, Wajanavisit W, Woratanarat P, Laohajaroensombat S, Tawonsawatruk T (2020): Is ankle fracture related to low bone mineral density and subsequent fracture? A systematic review. *Osteoporos Sarcopenia* 6 (3): 151–159.
- Urakawa I, Yamazaki Y, Shimada T, Iijima K, Hasegawa H, Okawa K, Fujita T, Fukumoto S, Yamashita T (2006): Klotho converts canonical FGF receptor into a specific receptor for FGF23. *Nature* 444 (7120): 770–774.
- van Halsema M S, Boers R A R, Leferink V J M (2022): An overview on the treatment and outcome factors of ankle fractures in elderly men and women aged 80 and over: a systematic review. *Arch Orthop Trauma Surg* 142 (11): 3311–3325.
- Wolf M (2012): Update on fibroblast growth factor 23 in chronic kidney disease. *Kidney Int* 82 (7): 737–747.