

Aus der
Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg / Saar
Direktor: Prof. Dr. med. Tim Pohlemann

**Langzeitgangveränderungen nach Talusfrakturen – dynamisch
pedobarographische Untersuchung mit einem voll integrierten
Ganganalysesystem**

Dissertation zur Erlangung des akademischen
Grades Doctor medicinae (Dr. med.)

der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

2018

vorgelegt von Patrick Pelz
geboren am 17.01.1991
in Bad Soden am Taunus

... meinen Eltern in Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract.....	3
1. Einleitung.....	5
1.1 Epidemiologie der Talusfraktur.....	5
1.2 Anatomie und Blutversorgung des Talus.....	6
1.3 Frakturmechanismen und Frakturklassifikation.....	12
1.4 Versorgungsmodalitäten	16
1.5 Nachbehandlung	17
1.6 Ergebnisse aus der Literatur.....	18
2. Fragestellung der Arbeit	19
3. Material und Methoden.....	20
3.1 Patientenkollektiv	20
3.2 Gangparcours.....	21
3.3 Messohle	22
3.4 Klinische Nachuntersuchungen	23
3.5 Radiologische Technik.....	27
3.6 Ganganalyse	28
3.7 Statistische Auswertung.....	30
4. Ergebnisse	31
4.1 Demographie	31
4.2 Vergleichende Statistik	33
4.3 Outcome-Korrelationen	37
5. Diskussion	44
5.1 Zusammensetzung des Patientenkollektivs.....	44
5.2 Klinisch radiologische Ergebnisse.....	45
5.3 Vergleich mit anatomisch nahen Frakturentitäten.....	48
5.4 Diskussion des prädiktiven Werts	50
6. Anhang.....	55
6.1 Abkürzungsverzeichnis.....	55

Inhaltsverzeichnis

6.2 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	56
7. Literaturverzeichnis	58
Eidesstattliche Versicherung	64
Danksagung	65
Publikation und Kongressbeiträge	66

Zusammenfassung

Langzeitgangveränderungen nach Talusfrakturen – dynamisch pedobarographische Untersuchung mit einem voll integrierten Ganganalysesystem

Talusfrakturen sind selten. Sie stellen eine erhebliche Herausforderung an den behandelnden Unfallchirurgen dar. Studien beschreiben hohe Raten von avaskulären Knochennekrosen und Arthrosen. Von der benachbarten Frakturart, der Calcaneusfraktur, ist bekannt, dass Gangveränderungen im Langzeitverlauf mit dem Behandlungsergebnis assoziiert sind und daraus therapeutische Konsequenzen abgeleitet werden können. Ähnliche Untersuchungen zu Talusfrakturen existieren noch nicht. Ziel der vorliegenden Studie ist es, Langzeitveränderungen im Gangbild von Patienten nach Talusfrakturen aufzudecken und Gangmuster, die mit schlechten funktionellen Ergebnissen verbunden sind zu identifizieren.

Über einen Zeitraum von 12 Jahren wurden an der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes insgesamt 61 Patienten mit Talusfrakturen operativ behandelt. Von diesen konnten 27 klinisch, radiologisch und per Ganganalyse auf einem speziellen Gangparcours nachuntersucht werden. Die Klassifizierung der Ergebnisse erfolgte mittels Olerud-Molander und AOFAS Score. Zur Ganganalyse wurde ein neues, kontinuierlich messendes und aufzeichnendes, sohlenbasiertes Pedobarographiesystem (OpenGO, Moticon GmbH, München) genutzt. Hiermit wurde auf einem Parcours bestehend aus Gang in der Ebene, Treppensteg, sowie ansteigender und abfallender Schrägen die Gangparameter Belastungsintegral, Maximaldruck, Druckmittelpunktsschwankung (COP), sowie temporospatiale Werte erhoben.

Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug 50,6 Jahre (range 24 – 81), das durchschnittliche follow up 78,3 Monate (range 21 – 150). Die durchschnittlichen AOFAS und Olerud-Molander Scores betragen 66 (range 20-100) und 54 (range 15-100). Es wurden signifikante Korrelationen zwischen der Verletzungsschwere in der Frakturklassifikation und der resultierenden Arthrose (Hawkins: $r_s=0.67$ / Marti-Weber: $r_s=0.5$; $p<0.05$) festgestellt. Zwischen der verletzten und gesunden Seite bestanden verschiedene Unterschiede mit Korrelation zum Outcome: Das Belastungsintegral und der Maximaldruck waren bei der Mehrzahl der Patienten vermindert. Assoziationen zwischen COP Verschiebung und Outcome, sowie zwischen temporospatialen Werten und Outcome wurden beobachtet. Die

Zusammenfassung

Druckverteilung bei Patienten mit subtalaren Verletzungen war signifikant lateralisiert (0.51 ± 1.1 vs. 1.09 ± 0.9 N/cm²; $p < 0.05$).

Die Ergebnisse unserer Studie zeigen, dass Talusfrakturen zu chronischen Gangbildveränderungen und erheblichen klinischen Funktionseinschränkungen im Langzeitverlauf führen können. Dabei können mittels der dynamischen Pedobarographie Gangmuster, die mit schlechtem Outcome assoziiert sind, subtiler als mit klinischen Untersuchungsmethoden identifiziert werden. Zukünftig könnte mit der hier vorgestellten Technik der Verlauf nach Talusfrakturen überwacht und bei Bedarf hinsichtlich eines besseren klinisch, funktionellen Ergebnisses therapeutisch beeinflusst werden. Durch die individuelle Gangbildanalyse können Physiotherapie und Orthesen besser auf die Erfordernisse des Patienten angepasst werden. Wünschenswert sind weitere pedobarographische Analysen, die sich auf die therapeutischen Interventionen konzentrieren.

Abstract

Long-term pathological gait pattern changes after talus fractures – dynamic pedobarographic study with a fully integrated gait analysis system

Talus fractures are rare and challenging to treat. Studies describe mediocre results with high rates of osteonecrosis and arthritis. From the neighbouring calcaneal fractures it is known that long term gait changes are associated with outcome and can have significant therapy implications. Comparable studies for talus fractures do not exist. Aim of the current study was thus to describe long-term gait changes after talus fractures and identify gait patterns associated with poor outcome.

Over the past 12 years 61 patients with talus fractures have been treated at the Department of Trauma, Hand and Reconstructive Surgery at Saarland University Hospital. Twenty-seven patients were followed-up clinically, radiographically and via gait analysis on a special gait parcours. Clinical controls were performed with the Olerud-Molander and AOFAS scores. For gait analysis a new continuous measuring and recording, insole based, dynamic pedobarography system (OpenGO, Moticon GmbH, Munich) was used. Analysis was performed on a standardized parcours consisting of even surface walking, up and down stair climbing and walking on an increasing and decreasing slope. The gait parameters load-integral, maximum load, center of pressure displacement (COP) and temporospatial parameters were surveyed.

The mean participant age was 50,6 years (range 24 – 81), the mean follow-up was 78.3 months (range 21-150). The mean AOFAS and Olerud-Molander scores were 66 (range 20-100) and 54 (range 15-100). Significant correlation between fracture classification and osteoarthritis (Hawkins: $r_s=0.67$ / Marti-Weber: $r_s=0.5$; $p<0.05$), along with several gait differences between injured and healthy side with correlations to outcome were seen: decreased step load-integral/ maximum load; associations between center of pressure displacement and outcome, as well as between temporospatial measures and outcome were seen. Pressure distribution was lateralized in patients with subtalar joint injury (0.51 ± 1.1 vs. 1.09 ± 0.9 N/cm²; $p<0.05$).

The results of our study show that talus fractures lead to chronic gait changes and restricted long term clinical function. Dynamic pedobarography can identify patterns associated with poor outcome and give leads to possible future treatment options and therefore influence the

Abstract

outcome. Prospectively the introduced technique could survey the long term outcome concerning a better clinical and functional outcome. Through gait analysis with the introduced protocol changes could be addressed individually by physical therapy and orthoses. Further studies focusing on therapeutic interventions are needed.

1. Einleitung

1.1 Epidemiologie der Talusfraktur

Talusfrakturen sind seltene Frakturen. Ihre Inzidenz beträgt etwa 0,3% ^{2,11} aller Frakturen und 1% der Frakturen des Fußskeletts. Davon entfallen etwa 50% auf den Talushals, die restlichen Frakturen verteilen sich etwa gleichermaßen auf das Sustentaculum tali, den Processus lateralis tali und die posterioren Gelenkanteile.

Ursachen stellen vor allem Hochrasanztraumata, wie Verkehrsunfälle, Stürze aus großer Höhe und direkte, hohe Krafteinwirkungen dar ^{20,49}. Aufgrund der hohen Gewalteinwirkung entstehen Talusfrakturen oft im Zusammenhang mit anderen muskuloskeletalen Verletzungen der unteren Extremität, wie etwa Frakturen des Ober- und Unterschenkels. Deshalb imponieren Talusfrakturen klinisch oft nicht als Hauptverletzung und neigen dazu bei nicht vollständiger Diagnostik übersehen zu werden ⁴⁷.

Durch seine hauptsächlich knorpelige Oberfläche (etwa 60%) und der daraus resultierenden prekären Blutversorgung entstehen nach Talusfrakturen oftmals posttraumatische Spätfolgen, wie avaskuläre Knochennekrosen (37%) und posttraumatische Arthrosen (68%) ^{2,13,33,41,49}. Studien zeigen eine klare Assoziation zwischen Frakturschwere und der Entwicklung dieser Spätfolgen bei Talushalsfrakturen ^{2,49}.

Bereits historisch haben diese Frakturen, wegen ihrer hohen Komplikationsrate und dem assoziierten schlechten Outcome, Unfallchirurgen herausgefordert. Sie führten sogar zu drastischen Empfehlungen, wie etwa der Unterschenkelamputation als primäre Behandlung ⁴¹ bei offenen Luxationsfrakturen. Auch trotz der modernen medizinischen Entwicklungen bleiben in der Behandlung dieser Fraktorentität technische Probleme bestehen. Die Behandlungsergebnisse sind durch Spätfolgen und schlechte Langzeitergebnisse getrübt.

1.2 Anatomie und Blutversorgung des Talus

Anatomie des Talus

Aufgrund seiner Lage und seinen anatomischen Besonderheiten nimmt der Talus eine Sonderstellung im menschlichen Skelett ein. Er verbindet den Unterschenkel mit dem Fußskelett. Dabei wirken auf ihn enorme Kräfte bei Belastung der unteren Extremität. Er artikuliert über 7 Gelenkflächen in 3 Gelenken. Aus diesem Grund ist seine Oberfläche zu 60% mit hyalinem Gelenkknorpel überzogen. Somit verbleiben nur etwa 40% die mit Periost überzogen sind und die einzige Möglichkeit zur Blutversorgung darstellen ^{46,57}.

Der Talus wird in Corpus, Collum und Caput gegliedert. Die Oberfläche des Corpus tali bildet die mit hyalinem Gelenkknorpel überzogene Trochlea tali, die eine trapezoidale Form besitzt und lateral von den beiden Malleoli umgeben wird. Die Trochlea tali verschmälert sich von ventral nach dorsal und gewährleistet somit eine stabile Führung im OSG bei Dorsalextension. Bei Plantarflexion ist das OSG auf Grund der schmalen dorsalen Fläche der Trochlea tali instabiler. Nach lateral läuft die Trochlea tali in den Processus lateralis aus, der ebenfalls mit hyalinem Knorpel überzogen ist und die Facies articularis fibularis bildet. Dorsal am Corpus tali befindet sich der Processus dorsalis, der durch die Sehne des Musculus flexor hallucis longus in ein Tuberculum mediale und laterale geteilt wird. Die Unterfläche des Corpus tali bildet die konkave Facies articularis calcanei, die mit dem Calcaneus artikuliert und den hinteren Anteil des USG (die Art. subtalaris) bildet ⁵⁷.

Das Caput tali wird durch die knorpelfreie Einschnürung, das Collum tali, vom Corpus tali getrennt. Das Caput tali besitzt ventral eine große konvexe knorpelige Fläche, die Facies articularis navicularis. Kaudal befinden sich zwei weitere knorpelige Gelenkflächen, die Facies articularis calcanea anterior und die Facies articularis calcanea media. Die beiden Facies articulares calcaneae medialis et lateralis bilden zusammen mit den korrespondierenden Flächen des Calcaneus und der Facies articularis navicularis mit ihrer korrespondierenden Fläche des Os naviculare und dem Pfannenband den vorderen Anteil des USG (die Art. talocalcaneonavicularis). Die vordere und hintere Kammer des USG sind durch den Sulcus tali voneinander getrennt. Der Sulcus tali am Talus und der Sulcus calcanei am Calcaneus bilden zusammen einen Knochenkanal, den Canalis tarsi, in dem das Lig. talocalcaneum interosseum verankert ist. Dieser erweitert sich nach lateral zum Sinus tarsi (Abb. 1 und Abb. 2) ⁵⁷.

1. Einleitung

Im oberen Sprunggelenk (Art. talocruralis/OSG) artikuliert die Trochlea tali mit den Facies articulares der Tibia (medial) und der Fibula (lateral). Es ist ein Scharniergelenk mit guter Bandführung. Medial wird das OSG durch das Lig. deltoideum, das aus 4 Anteilen besteht (Pars tibiotalaris anterior, Pars tibionavicularis, Pars tibiocalcanea und Pars tibiotalaris posterior), gesichert. Lateral wird das OSG durch 3 Bänder gesichert: Die Ligg. talofibularia anterius et posterius und das Lig. calcaneofibulare. Die Verschmälerung der Trochlea tali nach dorsal und die gute Bandführung des OSG gewährleisten eine hohe Stabilität in Dorsalextension. An der Bewegungsachse des OSG sind Plantarflexion und Dorsalextension des Fußes möglich ^{46,57}.

Das untere Sprunggelenk besteht aus 2 getrennten Gelenken mit eigenen Gelenkkapseln, die zusammen die funktionelle Einheit des USG bilden. In der hinteren Kammer (der Art. subtalaris) artikulieren die konkave Facies articularis calcanei des Corpus tali mit der konvexen Facies articularis talaris des Calcaneus. Die hintere Kammer wird von der vorderen durch das Lig. talocalcaneum interosseum getrennt. Die vordere Kammer bildet die Art. talocalcaneonavicularis, in dem Talus, Calcaneus und Os naviculare miteinander artikulieren. Es wird durch das Pfannenband (Lig. talocalcaneonaviculare) nach medial begrenzt und stabilisiert. Somit ist das USG in seiner Gesamtheit als Zapfen-Kugel Gelenk zu beschreiben. Mögliche Bewegungen sind Inversion und Eversion. Supination und Pronation des Fußes finden im Chopart- und Lisfranc-Gelenk statt ^{46,57}.

1. Einleitung

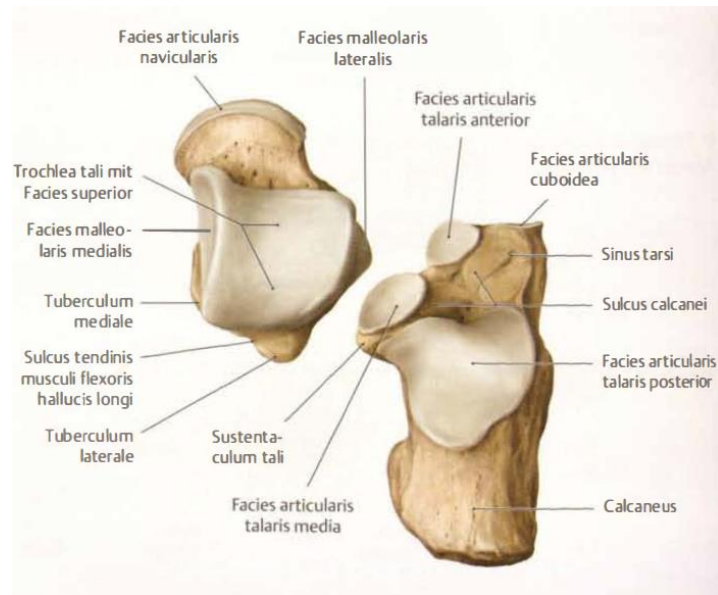


Abb. 1: Anatomie des Talus und Calcaneus (Ansicht von kranial)

(entnommen aus ⁵⁷⁾)

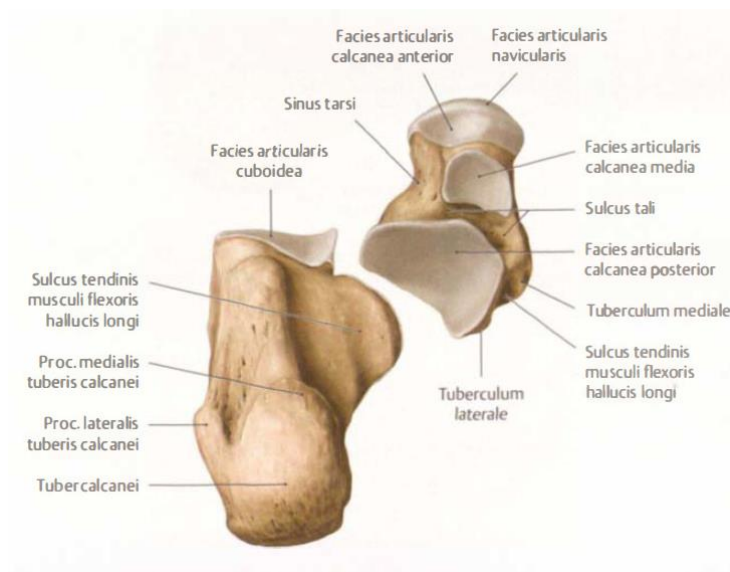


Abb. 2: Anatomie des Talus und Calcaneus (Ansicht von kaudal)

(entnommen aus ⁵⁷⁾)

1. Einleitung

Blutversorgung des Talus

Die große knorpelige Oberfläche des Talus (etwa 60%) bedingt die prekäre Blutversorgung und das hohe Risiko für posttraumatische Schäden, wie avaskuläre Knochennekrosen und posttraumatische Arthrosen³³.

Der Talus wird aus einem arteriellen Gefäßnetz, dem Rete periostale tali versorgt, das aus den 3 großen Arterien der unteren Extremität gespeist wird (Aa. tibialis anterior, tibialis posterior und fibularis). Aus diesem Gefäßnetz geht die nutritive Versorgung nach intraossär ab^{16,39}.

Die A. tibialis posterior (Abb. 3) gibt vor der Aufteilung in ihre Endäste die A. canalis tarsi ab. Dieser entspringen vor Eintritt in den Canalis tarsi Äste zum Rete periostale tali, bevor sie im Canalis tarsi Äste zur Versorgung des Taluskörpers abgibt und mit der A. sinus tarsi anastomosiert. Ein weiterer, klinisch bedeutsamer Abgang der A. canalis tarsi ist der Ramus deltoideus, der zwischen Teilen des Lig. deltoideum zur medialen Seite des Corpus tali zieht und dort mit Ästen der A. tibialis anterior anastomosiert. Um den processus posterior befindet sich das Rete periostale posterior, das aus der A. tubercularis posterior der A. tibialis posterior und aus kalkanären Ästen der A. fibularis gespeist wird^{35,39}.

Aus der A. dorsalis pedis (dem Endast der A. tibialis anterior) (Abb. 4) entspringen die Aa. tarsale medialis et lateralis, sowie die Rami anteriores malleolares mediales. Zur Versorgung des Caput tali dient die A. sinus tarsi, die variablen Ursprungs sein kann. Diese entsteht entweder aus einem Gefäßnetz durch den Zusammenfluss der A. tarsalis lateralis und eines Ramus perforans der A. fibularis oder entspringt direkt aus der A. dorsalis pedis. Die Äste zum Taluskopf gibt sie vor Eintritt in den Canalis tarsi und Anastomisierung mit der A. canalis tarsi ab. Aus der A. tarsalis lateralis ziehen Äste zum Caput tali und zum anterolateralen Corpus tali^{35,39,65}.

Der aus der A. fibularis stammende Ramus perforans zieht durch die Membrana interossea cruris zum dorsolateralen Talus und ist dort in einigen Fällen an der Bildung der A. sinus tarsi (Abb. 5) beteiligt. Kleinere Äste fließen in das Rete periostale posterior ein^{35,39,65}.

1. Einleitung

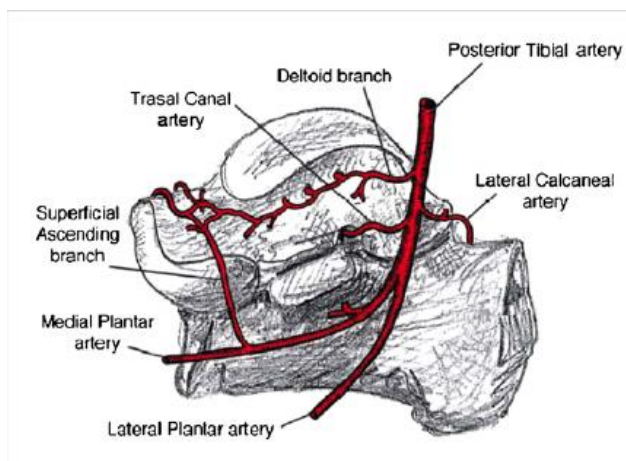


Abb. 3: Blutversorgung des Talus von lateral (entnommen aus ⁴⁹⁾)

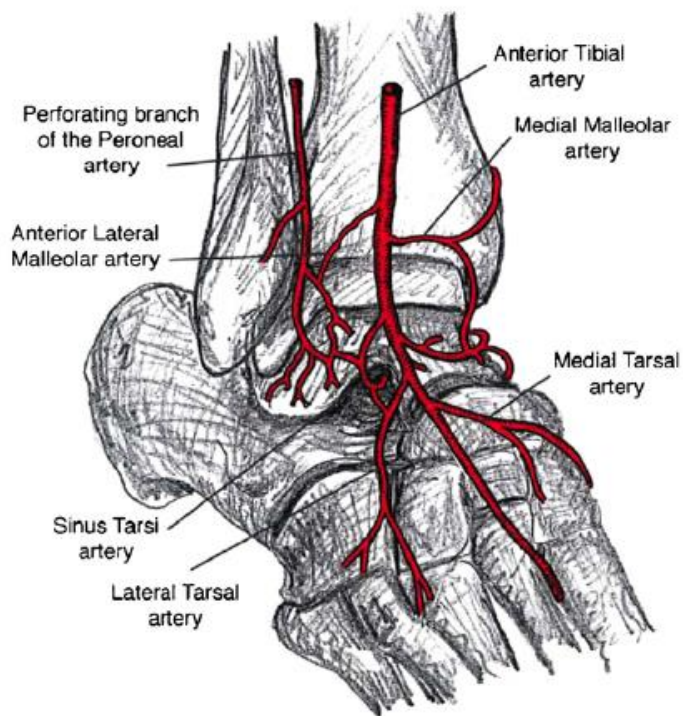


Abb. 4: Blutversorgung des Talus von medial (entnommen aus ⁴⁹⁾)

1. Einleitung

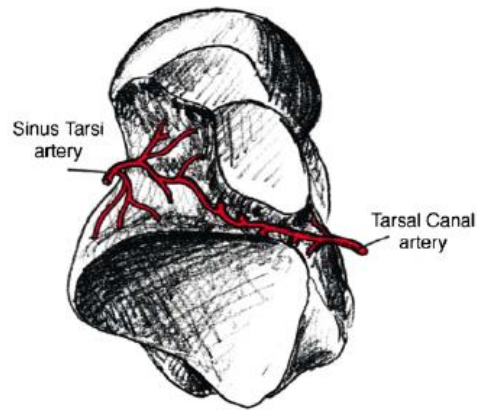


Abb. 5: Blutversorgung des Talus von plantar (entnommen aus ⁴⁹)

Weiterhin bilden die 3 großen Arterien der unteren Extremität ein intraossäres Gefäßnetz zu Versorgung des Talus (Abb. 6). Der Corpus tali wird hauptsächlich von Ästen der Anastomose zwischen der A. canalis tarsi und der A. sinus tarsi versorgt. Dabei treten die Gefäße auf Höhe des Collum tali in den Corpus tali ein und verlaufen von distal nach proximal. Bei Ruptur dieser Anastomose bei dislozierten Frakturen des Talus Halses steigt die Nekroserate stark an ⁵⁵. Weiterhin wird der Ramus deltoideus als bedeutendes Gefäß diskutiert, das den Talus nach Frakturen von medial revaskularisiert und damit im Rahmen des häufigen medialen OP-Zugangs besonders geschont werden sollte ^{33,49,55}. Das Tuberculum posterior wird ebenfalls intraossär aus kleinen Arterien des Rete periostale posterior versorgt. Die Gefäßversorgung des Caput tali kann in 2 Gebiete geteilt werden: Ein kranio-mediales Gebiet, das von Ästen der A. dorsalis pedis gespeist wird und ein kaudo-laterales Gebiet, das aus der A. sinus tarsi oder der A. tarsalis lateralis versorgt wird ^{35,39,65}.

1. Einleitung

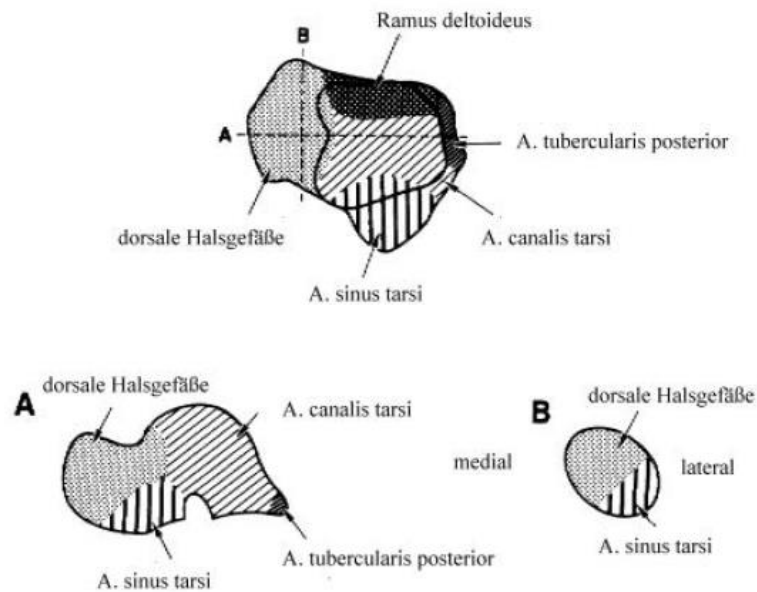


Abb. 6: Intraossäre Blutversorgung des Talus (entnommen aus ¹⁶⁾)

1.3 Frakturmechanismen und Frakturklassifikation

Frakturmechanismen

Die überwiegende Zahl an Talusfrakturen resultiert aus einer hohen Krafteinwirkung, wie etwa Verkehrsunfällen und Stürzen aus großer Höhe ^{11,20,41,49}. Aufgrund der großen Gewalteinwirkung entstehen sie oftmals in Begleitung von anderen, meist evidenteren, Verletzungen der betroffenen Extremität. Deshalb ist eine umfangreiche Diagnostik bei polytraumatisierten Patienten der unteren Extremität unabdingbar um die Talusfraktur nicht zu übersehen und die daraus resultierenden Spätfolgen abzuwenden ⁴⁷. Umgekehrt sollten bei Vorliegen von Talusfrakturen an weitere Verletzungen im Verlauf der Kraftkette gedacht werden.

Die genaue Stellung des Fußes kann dabei in Kombination mit dem Unfallmechanismus das Frakturbild bestimmen: Das Caput tali bricht oftmals bei einer axialen Stauchung in Plantarflexion, sowie bei Scher- und Rotationsbewegung in Inversion.

Der Mechanismus der Talushalsfraktur besteht meist aus einer axialen Krafteinwirkung bei Dorsalextension im OSG, einem forcierten Supinationstrauma oder aus einer direkten Krafteinwirkung auf das Collum tali. Bei ausgeprägtem Dorsalextensionstrauma und zusätzlicher Eversion oder Inversion kann es zu Luxationen der Frakturfragmente kommen.

1. Einleitung

Frakturen des Corpus tali geschehen häufig in Plantarflexion und Pronation. Den seltenen und komplizierten Sagital-Frakturen liegt meist ein Supinations- und Inversionstrauma zugrunde, bei dem bei anhaltender Krafteinwirkung der Talus von der medialen Tibiakante gespalten wird.

Der Processus posterior frakturiert in Plantarflexion und axialer Krafteinwirkung, bei Stürzen mit Rückfußinversion oder in Dorsalextension und Inversion. Bei letzterem Reißt das Tuberculum mediale meist ab (sog. Cedell Fraktur).

Bei der sog. Snowboarder's ankle Fraktur handelt es sich um eine Fraktur des Processus lateralis. Diese ist zumeist das Resultat eines Supinations- und Inversionstraumas mit hohen Kräften in Dorsalextensionsrichtung, oder eines senkrechten Stauchungstraumas bei proniertem Fuß. Selten ist auch ein Dorsalextensions-Inversions-Rotations Trauma ursächlich.

Osteochondrale Frakturen basieren zumeist auf einem Distorsions/Inversionstrauma. Dabei differenzieren sich die Läsionen in anterolateral gelegene (meist durch Dorsalextension und Rotation) und in posteromediale (meist durch Plantarflexion und axiale Stauchung)^{8,13,20}.

Frakturklassifikation

Talusfrakturen lassen sich zunächst in zentrale und periphere Frakturen unterteilen. Dabei wird eine Fraktur als zentral bezeichnet, wenn sie Corpus oder Collum tali betrifft. Als peripher wird sie bezeichnet, wenn sie Caput tali, Processus lateralis oder Processus posterior betrifft, oder es sich um eine osteochondrale Fraktur handelt.

Die Klassifikationen nach Hawkins (erweitert durch Canale and Kelly 1978) und nach Marti und Weber haben sich wegen ihrer Berücksichtigung der Blutversorgung und der Aussagekraft über das posttraumatische Arthroserisiko klinisch bewährt^{2,9,11,21}.

Die Marti und Weber Klassifikation (Tab. 1 und Abb. 7) bezieht sich auf sämtliche Frakturen des Talus⁴⁹. Dabei werden diese zunächst in periphere Frakturen (Typ 1) und in zentrale Frakturen (Typ 2-4) differenziert. Die zentralen Frakturen (Typ 2-4) werden weiterhin anhand ihres Dislokationsgrades eingeteilt.

1. Einleitung

Typ 1	Sämtliche periphere Frakturen (disloziert und undisloziert)
Typ 2	Nicht dislozierte Frakturen des proximalen Collum tali oder des Corpus tali
Typ 3	Dislozierte Frakturen des proximalen Collum tali oder des Corpus tali
Typ 4	Frakturen des proximalen Collum tali oder des Corpus tali mit Dislokation aus der Malleolengabel

Tab. 1: Frakturklassifikation nach Marti und Weber

Die Klassifikation nach Hawkins.(Tab. 2 und Abb. 7) bezieht sich speziell auf Frakturen des Talushalses ²². Hawkins differenzierte 3 Frakturtypen des Collum tali anhand ihrer Dislokation im USG und OSG. 1978 fügten Canale und Kelly einen Typ 4 hinzu ⁸.

Typ 1	Nicht dislozierte Fraktur des Talushalses
Typ 2	Fraktur des Talushalses mit Dislokation im USG
Typ 3	Fraktur des Talushalses mit Dislokation im USG und OSG
Typ 4	Fraktur des Talushalses mit Dislokation im USG, OSG und im Talonavikulargelenk

Tab. 2: Frakturklassifikation nach Hawkins

1. Einleitung

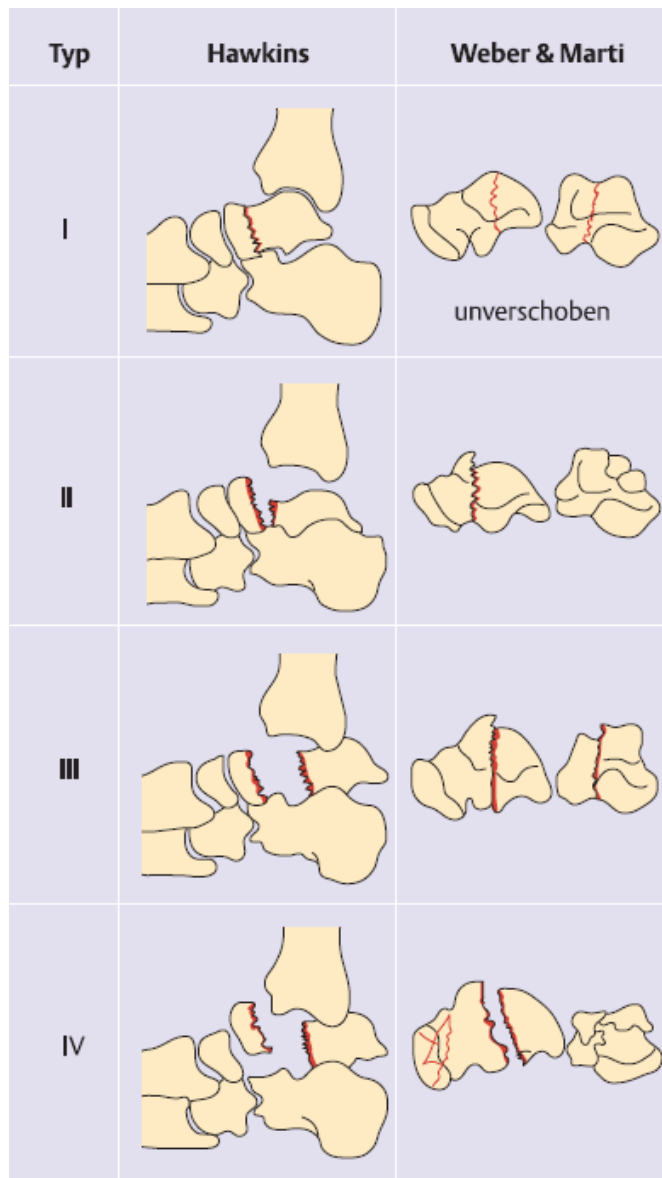


Abb. 7: Klassifikation von Talusfrakturen nach Hawkins und Marti und Weber
(entnommen aus ⁵¹)

Weiterhin können Osteochondrale Frakturen nach Berndt und Harty eingeteilt werden. Dabei entspricht eine Typ 1 Läsion einer reinen Impression mit Kompression der subchondralen Trabeculae. Typ 2 Läsionen zeichnen sich durch unvollständige Abhebung des Fragments aus. Im Gegensatz zu Typ 3 Läsionen bei denen das Fragment komplett abgehoben ist, sich jedoch noch in situ befindet. Eine Typ 4 Läsion liegt bei vollständiger Ablösung und Dislokation des Fragments vor.

1.4 Versorgungsmodalitäten

Die Behandlung von Talusfrakturen kann in konservative und operative Verfahren gegliedert werden. Die operativen Verfahren unterscheiden sich je nach Frakturtyp und Dislokationsgrad.

Empfohlen wird nur komplett undislozierte Körper- und Halsfrakturen konservativ zu behandeln. Dazu wird der betroffene Fuß in Neutralstellung im Unterschenkelgips für 6 Wochen fixiert. Die gängige Lehrmeinung ist, dass die Extremität im Anschluss an das Frakturereignis bis zum radiologischen Nachweis der Frakturvereinigung nur mit maximal 20 kp belastet werden sollte ⁴⁹.

Die operative Behandlung von nicht dislozierten Frakturen umfasst hauptsächlich Schraubeneosteosynthesen zur Kompression der Fraktur und Verhinderung einer Dislokation. Diese Versorgung ermöglicht eine Frühmobilisation. Dabei können kleine anteromediale oder posterolaterale Inzisionen als Zugang genutzt werden. Zunächst wird die Fraktur mit Kirschner Drähten fixiert um eine sekundäre Dislokation beim Bohren zu verhindern und anschließend mit Schrauben auch in perkutaner, minimalinvasiver Technik intern fixiert.

Dislozierte Talushalsfrakturen werden vornehmlich über den anteromedialen Zugang versorgt. Dabei muss der tiefe Teil des Lig. deltoideum geschont werden, da in diesem der Ramus deltoideus der A. tibialis posterior läuft, der eine wichtige Rolle bei der Revaskularisierung des Frakturareals spielt ⁴⁹. Je nach Dislokationsgrad und Fragmentation der Fraktur wird zusätzlich ein lateraler Zugang zur besseren Reposition gewählt. Die Fraktur wird zunächst mit Kirschner-Drähten fixiert und daraufhin bei starker Dislokation der Dislokationsgrad vom lateralen Zugang ausgehend beurteilt. Nach Röntgenkontrolle und Sicherstellung des Repositionserfolgs werden die Kirschner-Drähte durch Schrauben ersetzt.

Dislozierte Corpus Frakturen werden durch bilaterale Zugangswege (medialer und lateraler Zugang) analog zu Talushalsfrakturen versorgt.

Bei dislozierten Corpus und Collum Frakturen stellt die häufige Dislokation des Taluskörpers nach posterior ein hohes Risiko für Weichteilnekrosen dar. Deshalb muss die Reposition der Fragmente schnellstmöglich geschehen. Da dies in geschlossener Form technisch nur selten möglich ist und der entstehende Schaden durch wiederholte, frustrane Repositionsmanöver mitunter aggraviert wird, sollte je nach Erfahrung des Operateurs und Weichteilsituation eine primär definitive Versorgung, oder zumindest eine Reposition und Ruhigstellung im Fixateur

1. Einleitung

externe erfolgen. Dabei wird oftmals der anteromediale Zugang zur Durchführung einer offenen Reposition gewählt.

Bei polytraumatisierten Patienten wird eine temporäre Fixation mittels Kirschner-Drähten und tibio-metatarsalem Fixateur externe gewählt und die definitive Frakturversorgung in einer zweiten Operation sichergestellt.

Offene Frakturen werden analog zu offenen Frakturen anderer Entitäten durch zeitnahe Lavage und Debridement mit möglichst primärer interner osteosynthetischer Verschraubung versorgt. Dabei wird häufig ebenfalls der bilaterale Zugang von medial und lateral gewählt. Bei nicht möglicher primärer Osteosynthese oder polytraumatisiertem Patienten kann auch eine temporäre Fixation mittels Kirschner-Drähten und Fixateur Externe und eine sekundäre osteosynthetische Versorgung der Fraktur im Verlauf erfolgen. Dabei sollte die second look Operation innerhalb von 48 – 72 Stunden erfolgen um das Infektionsrisiko zu minimieren und eine frühfunktionelle Behandlung zu ermöglichen.

Die primäre subtalare Arthrodesese wird nur in Ausnahmefällen, wie etwa kompletter Zertrümmerung der Gelenkflächen, in Erwägung gezogen.

1.5 Nachbehandlung

Bei der Nachbehandlung von Talusfrakturen kommt der frühen Mobilisation zur funktionellen Wiederherstellung eine entscheidende Rolle zu ⁴⁹.

Postoperativ kann je nach Weichteilsituation eine Unterschenkelgipsschiene in neutraler Fußposition angelegt und die betroffene Extremität hochgelagert werden. Physiotherapie und CPM werden ab dem zweiten postoperativen Tag begonnen. Ausnahmen bestehen bei Frakturfixation mittels Fixateur externe. Bei diesen wird der Fixateur bis zur Weichteilkonsolidierung belassen und im Anschluss die definitive Versorgung angestrebt. Für 6 Wochen wird die betroffene Extremität mit einer Teilbelastung von 15-20kp geschont. Die Physiotherapie wird ambulant fortgesetzt. Ab der sechsten postoperativen Woche wird die Belastung unter physiotherapeutischer Überwachung stufenweise erhöht, mit dem Ziel der Vollbelastung nach 12 Wochen. Temporäre Kirschner Drähte werden im Mittel nach 6 Wochen postoperativ entfernt. Osteosynthesematerialien sollten nur bei Beschwerden oder Fehllagen entfernt werden.

1.6 Ergebnisse aus der Literatur

Neuere Reviews zeigen hohe Komplikationsraten für Talushalsfrakturen bezüglich avaskulären Nekrosen und posttraumatischen Arthrosen²⁰. Eine Assoziation zwischen Frakturschwere und der Entwicklung von avaskulären Knochennekrosen konnte dabei schon in älteren Studien dargestellt werden⁵. Ähnliche Ergebnisse und Korrelationen wurden in Studien bezüglich Taluskörperfrakturen gezeigt. Dabei liegt die Langzeitrate für eine Arthroseentstehung bei bis zu 70% je nach Studie¹³. All diese Langzeitkomplikationen sind mit einem gewissen Maß an funktioneller Beeinträchtigung, vor allem bei initial höhergradig dislozierten Frakturen, verbunden⁴⁹. Weiterhin steigt der Bedarf an sekundären Operationen mit dem Grad der initialen Frakturdislokation an^{49,55}. Assoziiert mit den funktionellen Einschränkungen sind grobe Gangbildveränderungen, die in die bekannten Funktions-Scores einfließen und das generelle klinische Outcome beeinflussen^{36,38}. In einer Studie wurden bisher Gangergebnisse als dezidiertes Outcomeparameter gruppiert erhoben¹⁵, detaillierte, pedobarographische Analysen der Gangbildveränderungen nach Talusfrakturen oder kontinuierliche quantitative Analysen wurden nach unserer Kenntnis bisher jedoch nicht durchgeführt.

Die Gangbildanalyse mittels Videoanalyse stellt eine schnelle, aussagekräftige und zuverlässige Methode dar um Pathologien im Bereich der unteren Extremität quantitativ und weiteren Verletzungsentitäten zu erfassen⁷. Auf Grund des aufwendigen benötigten Spezialequipment und den damit verbundenen hohen Kosten ist sie jedoch hauptsächlich auf große Forschungszentren beschränkt⁷ und in der klinischen Routine nicht praktikabel. Dadurch wurden bislang meist Studien mit kleinen Kohorten und speziellen Fragestellungen durchgeführt^{23,24,26}. Klinisch können durch Gangbildanalysen jedoch exakte Daten über die Frakturschwere und den tatsächlichen Heilungsprozess erfasst werden. Weiterhin können aus diesen Daten wichtige therapeutische Konsequenzen abgeleitet werden.

Wegen der großen Frakturvariabilität und hohen Komplikationsraten bei Talusfrakturen fordern aktuelle Reviews eine möglichst individuell angepasste Behandlung um das funktionelle Outcome zu verbessern und die Komplikationsrate zu erniedrigen^{2,13,49}.

2. Fragestellung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, Langzeitveränderungen nach Talusfrakturen im kinetischen und temporospatialen Gangbild zu erfassen und mögliche Zusammenhänge dieser Veränderungen mit der Frakturschwere, sowie dem radiologischen und klinischen Outcome darzustellen.

So ergeben sich folgende Fragen:

Welche Gangveränderungen treten im Langzeitverlauf nach Talusfrakturen auf?

Wie gestalten sich diese im Vergleich zur gesunden Gegenseite?

Bestehen Assoziationen zum klinischen Outcome?

3. Material und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

Ein retrospektives Studiendesign wurde gewählt. Einschlusskriterien waren alle Talusfrakturen, die zwischen 2002 und 2015 in der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes operativ versorgt wurden. Ausschlusskriterien waren eingeschränkte Mobilität oder Gangabnormalitäten vor dem Frakturereignis, nicht oder fehlverheilte Frakturen, Patienten unter dem Alter von 18 Jahren und Patienten mit einer Schuhgröße außerhalb des Bereichs 36-45 (EU). Da für letzteres Kriterium keine passenden Messsohlen existieren. Diesen Kriterien entsprechend wurden 61 Patienten identifiziert, kontaktiert und eingeladen an der Studie teilzunehmen. Von diesen meldeten sich 32 zurück, 27 wurden klinisch untersucht und in die Studie eingeschlossen.

Alle teilnehmenden Patienten haben eingewilligt, dass ihre Daten zu Studienzwecken verwendet werden. Die Studie wurde von der lokalen Ethikkommission genehmigt (Ärztchammer des Saarlandes 249/14).

3. Material und Methoden

3.2 Gangparcours

Die Gangbilddaten wurden beim Laufen auf einem vorgegebenen Parcours gesammelt. Dieser Parcours bestand aus einer ebenen Fläche (20 Meter), einem Treppenstieg (auf und ab, je 22 Treppenstufen) sowie einer ansteigenden und abfallenden schrägen Strecke mit ebenem festem Untergrund (20° Neigung, 20 Meter Länge). Alle Patienten absolvierten mindestens 20 Schritte bei jeder Aufgabe des Parcours in einem selbstgewählten, alltäglichen Gangtempo. Sie erhielten unbegrenzte Zeit sich an die Sohle zu gewöhnen und die Aufgaben zu bewältigen.

Die verschiedenen Aufgaben des Gangparcours sind in Abb. 8 dargestellt.

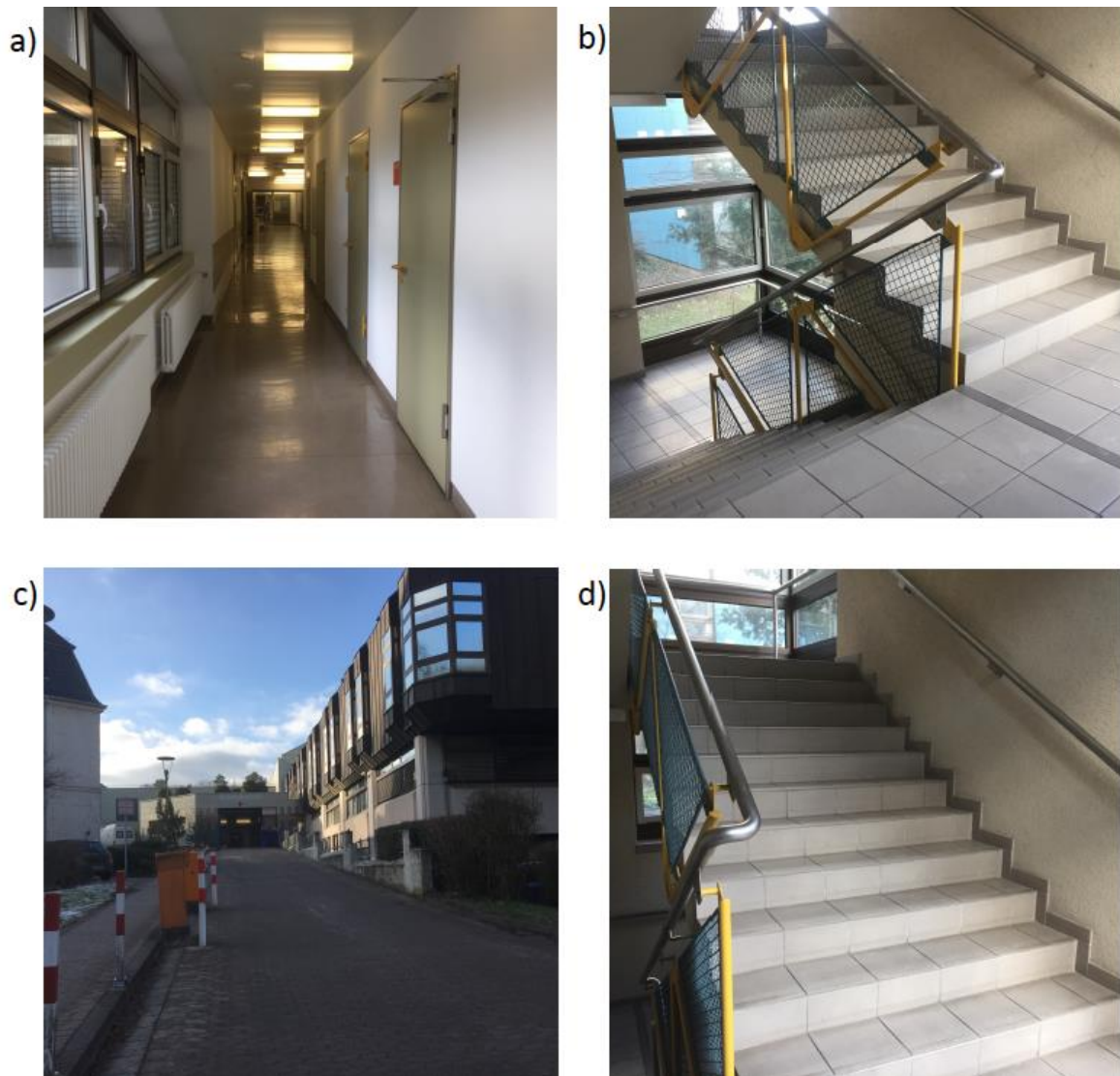


Abb. 8: Strecken des Gangparcours (a) Ebene, b) Treppenabstieg, c) Gefälle, d) Treppenaufstieg)

3.3 Messohle

Die Gangbilddaten wurden mit der OpenGo Sohle (Moticon GmbH; München, Deutschland) (Abb. 9) aufgenommen. Der obere Teil der Sohle besteht aus Kunstleder und ist somit wasch- und desinfizierbar, die Sohle somit mehrfach einsetzbar.

Die Messohle wiegt etwa 80 Gramm und entspricht in Form und Aussehen den Sohlen die von professionellen Läufern als Einlagen in ihren Schuhen getragen werden. Die Sohle enthält 13 kapazitive Druckmesssensoren, einen triaxialen Beschleunigungssensor und einen Temperatursensor. Die Sohle misst Maximaldruck, Druckverteilung, Beschleunigung, Bewegungssequenzen, Gangmuster und Temperatur. Sie funktioniert komplett kabellos und muss nur einmal an einem Computer über die Beaker Software (Moticon GmbH; München, Deutschland) aktiviert werden. Eine 10 Volt Lithiumbatterie gewährleistet Laufzeiten von bis zu 4 Wochen. Gangdaten werden automatisch auf einem in der Sohle integrierten Speicherchip aufgenommen. Die Gangbilddaten wurden mit einer Aufnahme-Frequenz von 50 Hz und mit allen Sensoren aktiviert aufgenommen. Vor der Messung wurden alle Sensoren der Sohle auf Null zurückgesetzt. Die Daten wurden mit der Beaker Software (Moticon GmbH; München, Deutschland) ausgewertet.



Abb.9: OpenGo Insole (Moticon GmbH; München, Deutschland)

3.4 Klinische Nachuntersuchungen

Alle Patienten wurden persönlich anamnestisch befragt und klinisch untersucht. Die Ergebnisse diese Untersuchungen wurden zur Erhebung des Olerud-Molander Scores (OMS) und des American Orthopedic Foot and Ankle Society Scores (AOFAS) herangezogen.

Olerud-Molander Score

C. Olerud und H. Molander evaluierten im Jahr 1984 an 90 Patienten mit Knöchelfrakturen anhand zuvor festgelegten Kriterien das klinische Outcome und die resultierende Beeinträchtigung³⁸. Dabei fanden sie eine signifikante Korrelation zwischen der Punktzahl ihres entwickelten Scores und dem klinischen Ergebnis.

Der Score besteht aus 9 Dimensionen mit einer jeweils variablen Zahl von Items. Für jedes Item wird eine festgelegte Punktzahl vergeben. Diese werden addiert und die Summe entspricht dem Ergebnis des Scores. Die Maximalpunktzahl beträgt 100 Punkte und entspricht einem optimalen Ergebnis und keinerlei Einschränkungen. Je niedriger die Punktzahl desto schlechter ist das klinische Ergebnis.

Der Score und seine Auswertung sind in den Tabellen 3 und 4 aufgeführt.

3. Material und Methoden

Schmerzen	Keine	25 Pkt.
	Beim Laufen auf unebener Fläche	20 Pkt.
	Beim Laufen auf ebener Fläche draußen	10 Pkt.
	Beim Laufen drinnen	05 Pkt.
	Immer und schwer	00 Pkt.
Steifigkeit	Keine	10 Pkt.
	Steifigkeit	00 Pkt.
Schwellung	Keine	10 Pkt.
	Nur abends	05 Pkt.
	Immer	00 Pkt.
Springen	Möglich	05 Pkt.
	Nicht möglich	00 Pkt.
Gehhilfen	Keine Gehhilfen	10 Pkt.
	Tape, Bandagen	05 Pkt.
	Stock oder Krücken	00 Pkt.
Arbeit und Alltagsaktivitäten	So, wie vor der Verletzung	20 Pkt.
	Verlust an Geschwindigkeit	15 Pkt.
	Wechsel zu einem einfacheren Beruf / Halbzeit	10 Pkt.
	Schwer beeinträchtigte Arbeitsfähigkeit	00 Pkt.
Rennen	Möglich	05 Pkt.
	Nicht möglich	00 Pkt.
Treppensteigen	Keine Probleme	10 Pkt.
	Beeinträchtigt	05 Pkt.
	Nicht möglich	00 Pkt.
Kniebeugen	Keine Probleme	05 Pkt.
	Nicht möglich	00 Pkt.

Tab. 3: Olerud-Molander Score

Ergebnisse	91-100 Punkte	Sehr gut
	61-90 Punkte	Gut
	31-60 Punkte	Mäßig
	0-30 Punkte	Schlecht

Tab. 4: Auswertung des Olerud-Molander Scores

AOFAS Score

Der 1994 von der American Orthopedic Foot and Ankle Society entwickelte Score ist im Gegensatz zum Olerud-Molander Score nicht validiert, zeigt jedoch insgesamt eine ähnliche Tendenz³⁶. Der Score für Knöchel und Rückfuß besteht aus 9 Dimensionen, die auf die 3 Überpunkte Schmerz (40 Punkte), funktionelle Aspekte (50 Punkte) und Alignment (10 Punkte) verteilt sind. Die Punktzahlen für die jeweiligen Items werden addiert. Die maximale Punktzahl beträgt ebenfalls 100 Punkte. Der Score ist in Tabelle 5 dargestellt.

Schmerz	Kein	40 Pkt.
	Leicht, gelegentlich	30 Pkt.
	Mittelmäßig, täglich	20 Pkt.
	Heftig, fast immer	00 Pkt.
Funktion	Keine Einschränkung, keine Stütze/Hilfe	10 Pkt.
	Keine Einschränkungen bei den täglichen Aktivitäten, Einschränkungen bei Freizeitaktivitäten, keine Hilfen	07 Pkt.
	Einschränkungen bei tägl. Aktivitäten, Freizeitaktivitäten; Stock	04 Pkt.
	Starke Einschränkungen bei tägl. Aktivitäten, Gehstütze, Krücke, Rollstuhl, Korsett	00 Pkt.
Gehstrecke (in Blocks)	Mehr als 6	05 Pkt.
	4 bis 6	04 Pkt.
	1 bis 3	02 Pkt.
	Weniger als 1	00 Pkt.
Gehen auf Oberflächen	Keine Schwierigkeiten auf sämtlichen Oberflächen	05 Pkt.
	Geringe Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigung, Leiter	03 Pkt.
	Große Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigung, Leiter	00 Pkt.
Gangabnormalität	Keine, leichte	08 Pkt.
	Augenscheinlich	04 Pkt.
	Erheblich	00 Pkt.
Saggitale Bewegung	Normal, leichte Einschränkung (30 Grad oder mehr)	08 Pkt.
	Mäßige Einschränkung (15-29)	04 Pkt.
	Starke Einschränkung (weniger als 15)	00 Pkt.
Hinterfußbewegung	Normal oder leichte Einschränkung (75%-100%)	06 Pkt.
	Mäßige Einschränkung (25%-74%)	03 Pkt.
	Massive Einschränkungen (weniger als 25%)	00 Pkt.

3. Material und Methoden

Gelenk-Hinterfuß-Stabilität (ap, varus, valgus)	Stabil	08 Pkt.
	Definitiv instabil	00 Pkt.
Achse	Gut plantigrader Fuß, Gelenk-Hinterfußachse normal	10 Pkt.
	Ausreichend plantigrader Fuß, um einige Grad der Gelenk-Hinterfußachse abweichend ohne Symptome	05 Pkt.
	Nicht plantigrader Fuß, erhebliche Abweichung der Gelenk-Hinterfußachse mit Symptomen	00 Pkt.

Tab. 5: AOFAS Score

3.5 Radiologische Technik

Die initialen radiologischen Untersuchungen wurden analysiert und alle Frakturen gemäß der Marti-Weber Klassifikation eingeteilt ⁴⁹. Frakturen des Talushalses wurden zusätzlich nach Hawkins (modifiziert nach Canale und Kelly) klassifiziert ^{3,8,21}. Bei der klinischen Nachuntersuchung wurden die aktuellsten Röntgenbilder beurteilt und der Arthrosegrad des oberen und unteren Sprunggelenks und des Talonavikulargelenks erfasst und nach Bargon klassifiziert.

Die Röntgenbilder umfassten die Standardaufnahmen des Sprunggelenks (Sprunggelenk antero-posterior (als Mortise view), Sprunggelenk seitlich mit Calcaneus und Fuß dorso-plantar).

Die Bargon Klassifikation der posttraumatischen Arthrose erstbeschrieben 1978 ist in Tabelle 6 dargestellt.

Arthrosegrad	Radiologisches Zeichen
0	Sklerose ohne Gelenkspaltverschmälerung
I	Sklerosezone, geringe Gelenkspaltverschmälerung, Randwulstbildung
II	Zusätzlich Schliffurchen oder Aufrauungen der subchondralen Knochenlamelle
III	Sklerosierung, deutliche Gelenkspaltverschmälerung, Defekte im subchondralen Knochen, zystische Aufhellungen

Tab. 6 : Röntgenmorphologische Klassifikation der posttraumatischen Arthrose nach Bargon

3.6 Ganganalyse

Ein Gangzyklus umfasst eine Standphase (etwa 60%) und eine Schwungphase (etwa 40%) (Abb. 10). Die Standphase beginnt mit dem Fersenkontakt des Fußes und endet mit der Abhebung der Zehen vom Boden. Die Schwungphase läuft zwischen zwei Standphasen ab. Folglich beginnt sie mit der Abhebung der Zehen vom Boden und endet mit dem Fersenkontakt zum Boden. Dabei wird das Bein, das sich auf dem Boden befindet als Standbein bezeichnet, die Gegenseite als Schwungbein. Somit ist ein Gangzyklus als die Zeit zwischen zwei Fersenkontakten desselben Fußes definiert ⁴.

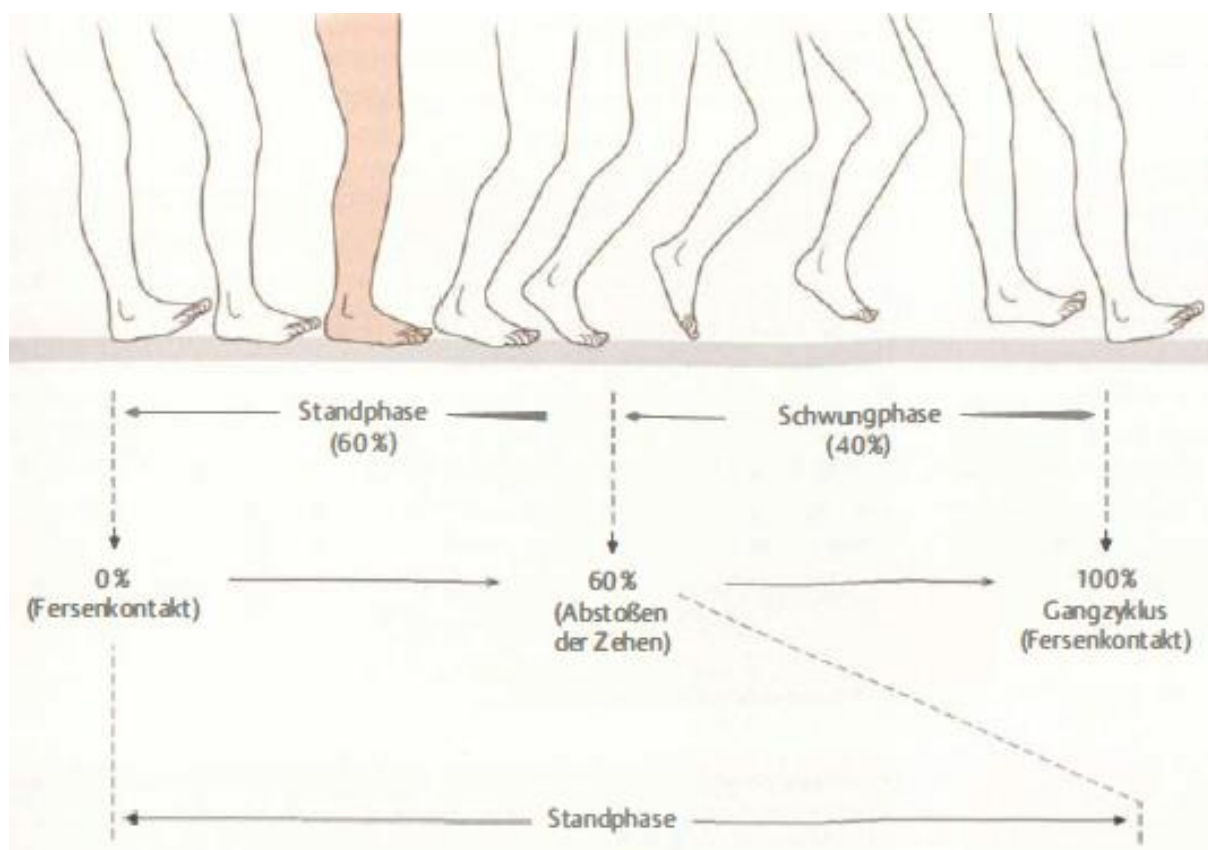


Abb. 10: Gangzyklus (entnommen aus ⁵⁷)

Folgende Werte wurden während der Ganganalyse erhoben:

Belastungsintegral, Maximallast, Druckmittelpunktschwankung (COP) und weitere temporospatiale Parameter.

Das Belastungsintegral definiert die Fläche unter der Gangkurve eines Schrittes (Abb.11). Der höchste dabei aufbrachte Druck bezeichnet die Maximallast (Abb.11). Die Druckmittel-

3. Material und Methoden

punktschwankung (COP) bezeichnet die Abweichung der einzelnen Druckwerte um den mittleren Druckpunkt während einer Standphase in einer antero-posterioren und einer medio-lateralen Richtung.

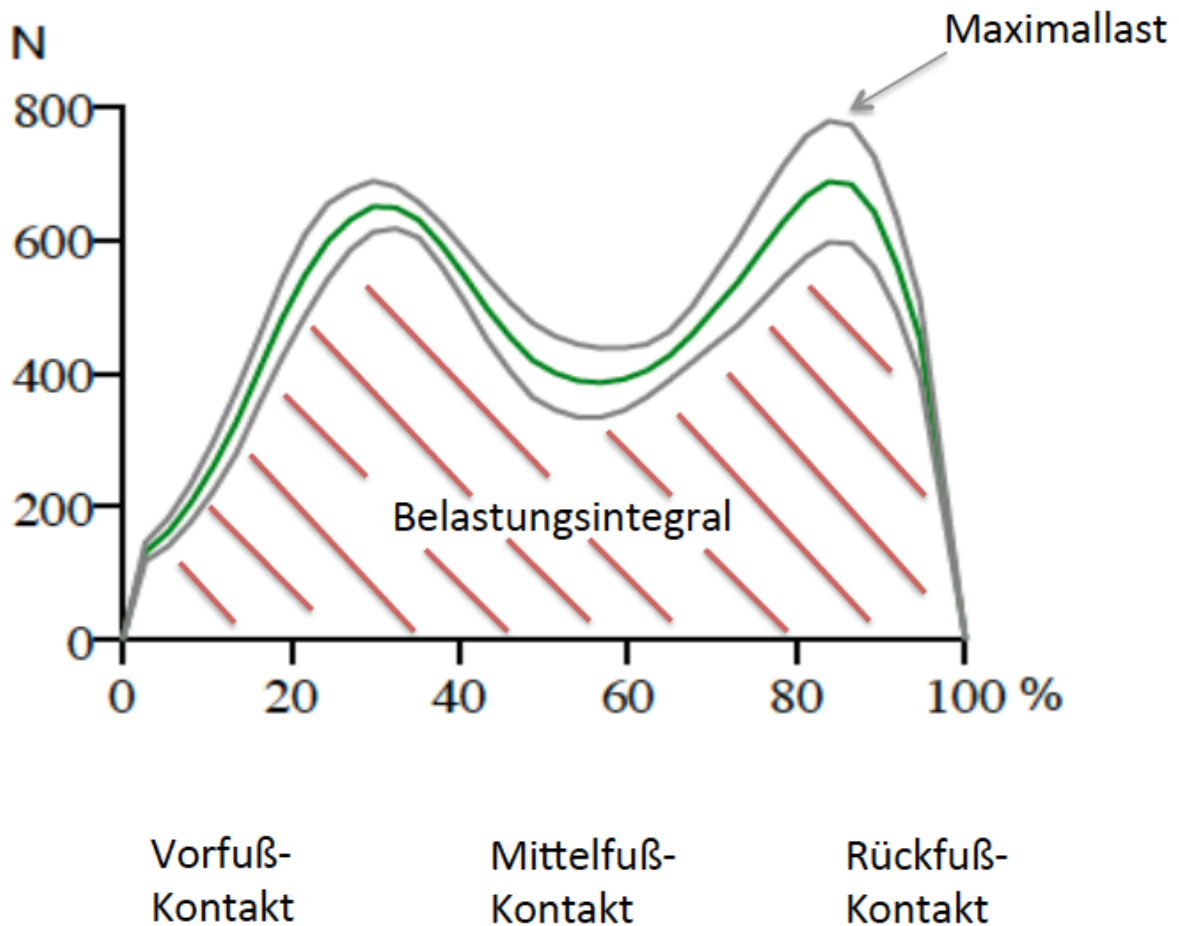


Abb.11: Gangkurve eines Schrittes des rechten Fußes eines Probanden mit Darstellung der Maximallast und des Belastungsintegrals

Temporospatiale Parameter sind Werte, die zeitliche Aspekte des Gangzyklus widerspiegeln (Standzeit, Schwungzeit, Doppelstützzeit, Kadenz). Die Standzeit beschreibt den Zeitraum in dem ein Fuß im Kontakt mit dem Untergrund ist. Die Schwungzeit gibt die Zeit an, in der sich eine Extremität in der Luft befindet. Die Doppelstützzeit beschreibt den Zeitraum, in dem sich beide Füße gleichzeitig auf dem Untergrund befinden. Die Kadenz definiert die Anzahl von vollständigen Schrittzyklen (Schritt links und rechts pro Minute).

Kinetische und temporospatiale Parameter, sowie durchschnittliche anteroposteriore (ap) und mediolaterale (ml) center of pressure (COP) Verschiebungen wurden für jeden Schritt und

3. Material und Methoden

jede Aufgabe unabhängig berechnet. Um die absolute Druckverteilung zu analysieren wurden die Sensoren anhand der anteroposterioren und der mediolateralen Mittellinie geteilt und der Durchschnittliche Druck für jeden Quadranten analysiert (Vorfuß medial/lateral ; Hinterfuß medial/lateral).

3.7 Statistische Auswertung

Die Überprüfung der Normalverteilung der Daten erfolgte mit dem D'Agostino Pearson Test. Unterschiede zwischen gesunder und verletzter Seite wurden mit dem gepaarten t-Test/Wilcoxon Test verglichen. Für den Vergleich der Unterschiede zwischen dislozierten und nicht dislozierten Frakturen diente der unpaarige t-Test/Mann Whitney Test. Bei der Analyse der Unterschiede zwischen verletzter und gesunder Seite für alle Gangparameter kam der Korrelationskoeffizient nach Spearman zum Einsatz. Dabei zeigen positive Koeffizienten höhere Werte für die zuvor frakturierte Seite an. Dieser Zusammenhang gilt bei einem Signifikanzniveau von $P < 0,05$. Zur Durchführung der statistischen Analyse diente die Software Prism 6.0 (GraphPad Software Inc. La Jolla, USA).

4. Ergebnisse

4.1 Demographie

Insgesamt wurden 61 Patienten mit operativ versorgten Talusfrakturen zwischen 2002 und 2015 in der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes identifiziert, kontaktiert und eingeladen an der Studie teilzunehmen. Von diesen meldeten sich 32 zurück, 27 konnten klinisch untersucht und in die Studie eingeschlossen werden (loss to follow up: 51%).

Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug 50,6 Jahre (range 24 – 81), das durchschnittliche follow up 78,3 Monate (range 21 – 150). Die durchschnittlichen AOFAS und Olerud-Molander Scores betrugen 66 (range 20-100) und 54 (range 15-100). Der durchschnittliche Bargon Score betrug 0,9 (range 0-3). Acht Patienten (30%) wiesen Nekrosen des Talus auf. Vierzehn Patienten (52%) wiesen Arthrosen der sub- und peritalaren Gelenke auf. Nach der Klassifikation von Marti und Weber lagen 3 mal Typ I, 11 mal Typ II, 12 mal Typ III und eine Typ IV Fraktur vor. Nach der Hawkins Klassifikation für Talushalsfrakturen lagen 4 mal Typ I, 2 mal Typ II, 6 mal Typ III und keine Typ IV Fraktur vor (Tab. 7). Dabei war bei 10 Patienten die rechte Seite und bei 15 die linke Seite von der Fraktur betroffen. Bei zwei Patienten lag eine bilaterale Talus Fraktur vor.

Im gesamten Patientenkollektiv waren für 56% der Frakturen ein Sturz, für 30% ein Verkehrsunfall und für 14% sonstige Traumata des Fußes ursächlich. 80% der Patienten waren männlich und 20% weiblich. Acht Patienten präsentierten sich mit weiteren Verletzungen der unteren Extremität: 44% waren Frakturen im Bereich des Kniegelenks, 33% waren weitere Frakturen des Fußes und 22% Frakturen des Femur. Es wurde kein Unterschied zwischen Patienten mit und ohne weitere Verletzungen der unteren Extremität festgestellt. Die Frakturen wurden in 95% der Fälle mit einer Schraubenosteosynthese, in 3% mit einer temporären Spickdrahtfixation, in 2% mit einem temporären Fixateur Externe und in ebenfalls 2% mit einer Plattenosteosynthese erstversorgt. Es bestand keine Korrelation zwischen Patientenalter und klinischen Scores oder follow up Zeit und klinischen Scores.

4. Ergebnisse

Alter in Jahren (range)	50,6 (24 -81)		
Follow-Up in Monaten (range)	78,3 (21 – 150)		
Marti-Weber Klassifikation (%)		Hawkins Klassifika- tion (%)	
I	3 (11%)	I	4 (33%)
II	11 (41%)	II	2 (17%)
III	12 (44%)	III	6 (50%)
IV	1 (4%)	IV	0 (0%)
Bargon Score (range)	0,9 (0 – 3)		
Nekrosen (%)	8 (30)		
Arthrosen (%)	14 (52)		
AOFAS Score (range)	66 (20 – 100)		
Olerud Molander Score (range)	54 (15 – 100)		

Tab. 7: Demographische Ergebnisse

4.2 Vergleichende Statistik

Bei folgenden Gangaktivitäten waren signifikante Veränderungen zwischen der verletzten und nicht verletzten Extremität nachweisbar:

Am meisten vermindert waren das Belastungsintegral (Abb. 12 a) und die Maximallast (Abb. 12 b) bei jeder Gangaufgabe auf der zuvor frakturierten Extremität. Beim Gehen auf ebener Oberfläche betrug das Belastungsintegral 274.2 ± 71.11 kg/Schritt auf der gesunden Extremität verglichen mit 232.1 ± 66.06 kg/Schritt auf der verletzten Extremität ($p < 0.05$). Die Maximallast bei dieser Gangaufgabe betrug 113.4 ± 22.99 kg auf der gesunden und 97.80 ± 21.92 kg auf der zuvor verletzten Extremität ($p < 0.05$). Beim Treppenaufstieg ergaben sich für das Belastungsintegral 212.1 ± 69.48 kg/Schritt für die gesunde im Vergleich mit 170.4 ± 45.35 kg/Schritt für die zuvor frakturierte Extremität ($p < 0.05$). Die Maximallast ergab Werte von 113.4 ± 25.74 kg für die gesunde verglichen mit 82.13 ± 20.75 kg für die verletzte Extremität ($p < 0.05$). Beim Treppenabstieg kam es für das Belastungsintegral zu Werten von 273.9 ± 70.72 kg/Schritt auf der gesunden Extremität und 214.2 ± 61.21 kg/Schritt für die zuvor verletzte Extremität ($p < 0.05$). Für die Maximallast ergaben sich 118.4 ± 25.95 kg für die gesunde im Vergleich zu 96.48 ± 26.43 kg für die zuvor verletzte Extremität ($p < 0.05$). Für den Gang auf ansteigender Schräge wurden für das Belastungsintegral für die gesunde Extremität 243.8 ± 71.35 kg/Schritt verglichen mit 207.4 ± 58.29 kg/Schritt für die verletzte Extremität festgestellt ($p < 0.05$). Die Maximallast betrug hierbei für die gesunde Extremität 110.0 ± 27.72 kg und 94.17 ± 21.82 kg für die verletzte Extremität ($p < 0.05$). Beim laufen auf abfallender Schräge ergaben sich für das Belastungsintegral 220.6 ± 72.88 kg/Schritt für die gesunde Extremität verglichen mit 185.1 ± 50.68 kg/Schritt für die zuvor frakturierte Extremität ($p < 0.05$). Die Maximallast betrug 98.61 ± 25.86 kg für die gesunde und 86.75 ± 20.16 kg für die zuvor frakturierte Extremität ($p < 0.05$). Diesen Daten belegen, dass Patienten nach Talusfrakturen bei allen Gangaufgaben die betroffene Extremität sowohl mit weniger Gewicht als auch für einen kürzeren Zeitraum belasten. Dies ist als erhebliche Beeinträchtigung im Gangbild einzustufen.

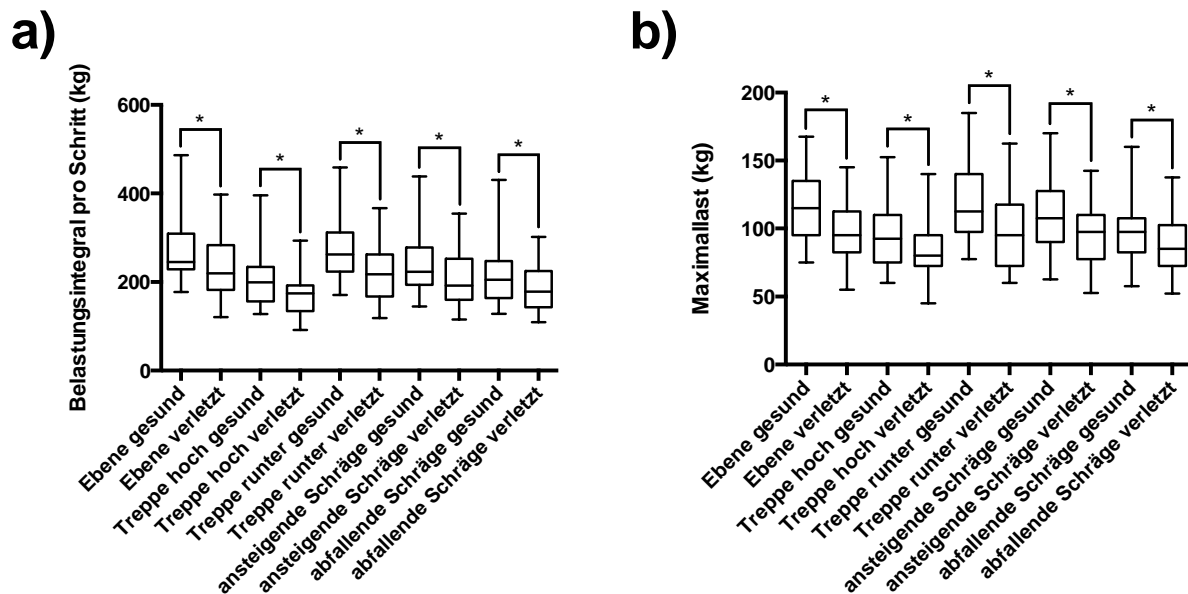


Abb. 12: Box plots der Werte für die verschiedenen Gangparameter für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität a) Belastungsintegral pro Schritt, b) Maximallast

Für die antero-posteriore COP Schwankung wurden keine signifikanten Veränderungen festgestellt (Abb. 13 a). Jedoch war die medio-laterale COP Schwankung beim Treppenaufstieg (gesund: 12.61 ± 3.22 mm vs. verletzt: 11.23 ± 3.55 mm, $p < 0.05$) und ebenfalls beim Laufen auf der abfallenden Schräge (gesund: 20.31 ± 3.75 mm vs. verletzt: 18.72 ± 4.02 mm, $p < 0.05$) für die verletzte Extremität vermindert (Abb. 13 b). Beim Treppenabstieg hingegen war diese auf der verletzten Extremität erhöht (gesund: 10.68 ± 2.92 mm vs. verletzt: 11.69 ± 3.25 mm, $p < 0.05$). Dies zeigt, dass die Ganglinie zwar nicht in der antero-posterioren Achse beeinträchtigt ist, jedoch in medio-lateraler in verschiedener Weise.

4. Ergebnisse

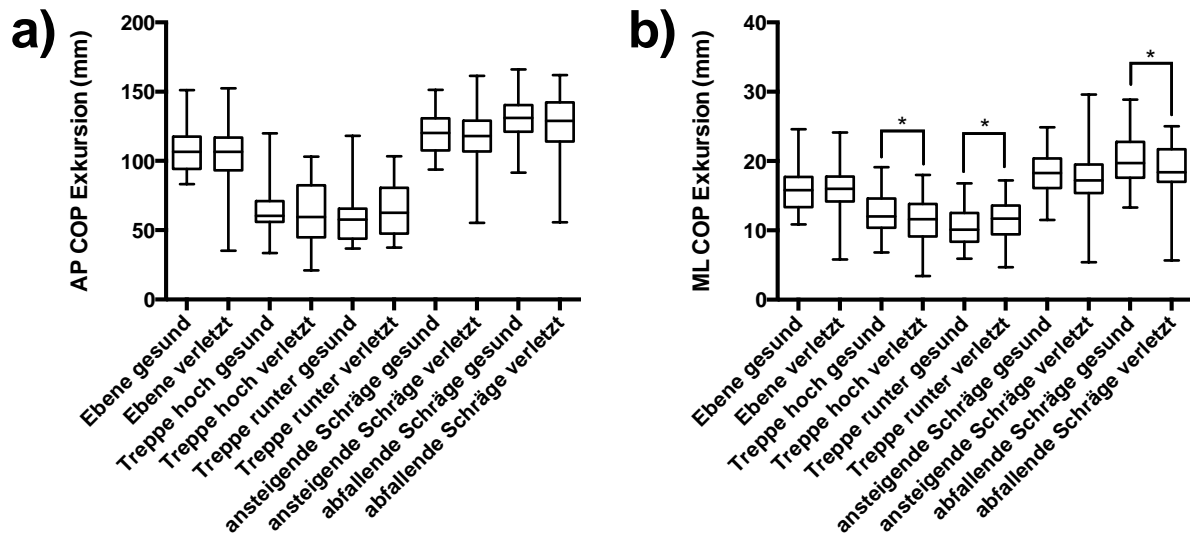


Abb. 13: Box plots der Werte für die verschiedenen Gangparameter für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität; a) antero-posteriore Druckmittelpunktsschwankung, b) medio-laterale Druckmittelpunktsschwankung

Die Standzeit war beim Laufen auf ebener Oberfläche (gesund: 0.723 ± 0.06 s vs. verletzt: 0.715 ± 0.06 s, $p < 0.05$), beim Treppenaufstieg (gesund: 0.930 ± 0.16 s vs. verletzt: 0.907 ± 0.17 s, $p < 0.05$) und beim Laufen auf ansteigender Schräge (gesund: 0.715 ± 0.14 s vs. verletzt: 0.709 ± 0.13 s, $p < 0.05$) auf der gesunden Extremität erhöht (Abb. 14). Dies bedeutet, dass die gesunde Extremität bei diesen Gangaufgaben länger, die zuvor verletzte hingegen kürzer belastet und somit entlastet wird. Diese Zahlen bestätigen die Beobachtung, dass alle Patienten ein vermindertes Belastungsintegral und eine verminderte Maximallast auf der verletzten Extremität aufwiesen.

4. Ergebnisse

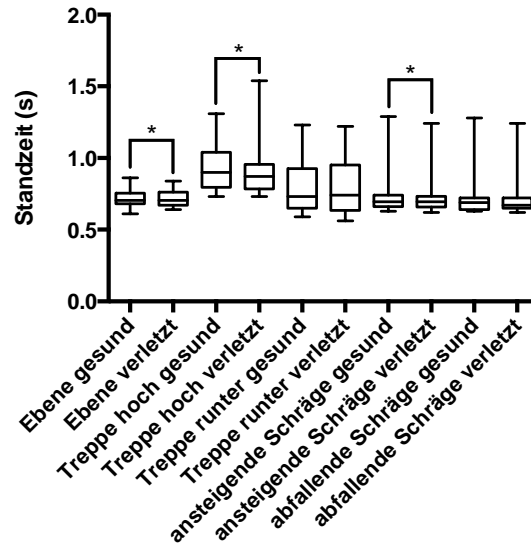


Abb. 14: Box plots der Werte für die Standzeit für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität

Die Schwungzeit war nur beim Laufen auf ebener Oberfläche auf der verletzten Extremität erhöht (gesund: 0.403 ± 0.03 s vs. verletzt: 0.418 ± 0.05 s, $p < 0.05$) (Abb. 15). Folglich befindet sich die verletzte Extremität beim Gang auf ebener Oberfläche länger in der Schwungphase und somit in der Luft, als die gesunde Extremität. Dies bedeutet, dass durch diesen Umstand die verletzte Extremität ebenfalls kürzer belastet und somit entlastet wird.

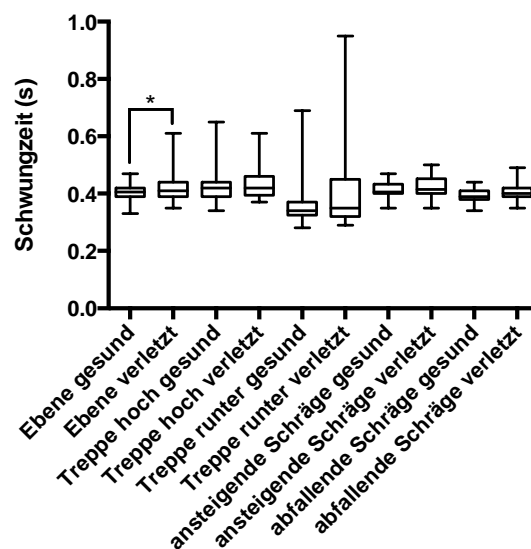


Abb. 15: Box plots der Werte für die Schwungzeit für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität

4.3 Outcome-Korrelationen

Verschiedene Korrelationen zwischen Gangparametern und klinischem und radiologischem Outcome konnten festgestellt werden. Alle r_s und p-Werte sind in der kompletten Korrelationsmatrix aufgeführt (Abb. 16).

Beim Laufen auf ebener Oberfläche war die antero-posteriore COP Abweichung für beide klinischen Scores positiv mit dem klinischen Outcome korreliert (AOFAS: $r_s= 0.46$, $p<0.05$; OMS: $r_s= 0.43$, $p<0.05$) (Abb. 17) und die medio-laterale COP Abweichung ebenfalls positiv mit dem AOFAS Score korreliert ($r_s= 0.53$, $p<0.05$). Dies bedeutet, dass Patienten mit einem besseren funktionellen Ergebnis eine längere AP-Ganglinie und somit eine bessere Abrollbewegung aufweisen.

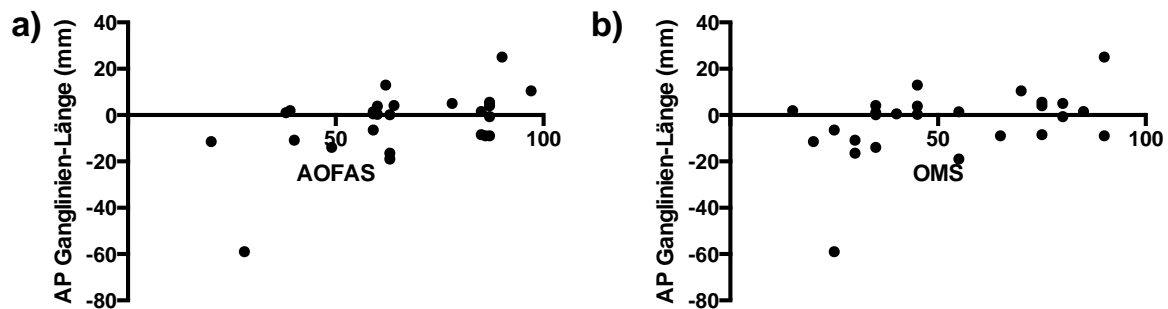


Abb. 17: Korrelationen des AOFAS Scores (a) und des Olerud-Molander Scores (b) mit der antero-posterioren Ganglinien-Länge beim Gehen in der Ebene

4. Ergebnisse

	Ebene			Treppenaufstieg			Treppenabstieg			Ansteigende Schräge			Abfallende Schräge		
	Bargon	AOFAS	OMS	Bargon	AOFAS	OMS	Bargon	AOFAS	OMS	Bargon	AOFAS	OMS	Bargon	AOFAS	OMS
GLL AP	$r_s = -0.17$ $p = 0.39$	$r_s = 0.46$ $p = 0.016$	$r_s = 0.43$ $p = 0.024$	$r_s = 0.06$ $p = 0.75$	$r_s = 0.14$ $p = 0.48$	$r_s = 0.31$ $p = 0.11$	$r_s = -0.13$ $p = 0.51$	$r_s = -0.07$ $p = 0.73$	$r_s = -0.04$ $p = 0.86$	$r_s = -0.08$ $p = 0.68$	$r_s = 0.29$ $p = 0.14$	$r_s = 0.31$ $p = 0.12$	$r_s = -0.18$ $p = 0.36$	$r_s = 0.33$ $p = 0.10$	$r_s = 0.36$ $p = 0.07$
GLL ML	$r_s = 0.00$ $p = 0.99$	$r_s = 0.53$ $p = 0.004$	$r_s = 0.36$ $p = 0.06$	$r_s = 0.12$ $p = 0.56$	$r_s = 0.20$ $p = 0.32$	$r_s = 0.30$ $p = 0.12$	$r_s = 0.05$ $p = 0.82$	$r_s = 0.39$ $p = 0.05$	$r_s = 0.23$ $p = 0.26$	$r_s = 0.29$ $p = 0.14$	$r_s = 0.41$ $p = 0.03$	$r_s = 0.23$ $p = 0.24$	$r_s = -0.03$ $p = 0.89$	$r_s = 0.45$ $p < 0.05$	$r_s = 0.27$ $p = 0.18$
Standzeit	$r_s = 0.38$ $p = 0.06$	$r_s = -0.04$ $p = 0.84$	$r_s = -0.15$ $p = 0.45$	$r_s = -0.46$ $p = 0.02$	$r_s = 0.33$ $p = 0.10$	$r_s = 0.46$ $p = 0.02$	$r_s = 0.10$ $p = 0.64$	$r_s = 0.17$ $p = 0.42$	$r_s = 0.27$ $p = 0.20$	$r_s = 0.13$ $p = 0.52$	$r_s = 0.00$ $p = 0.98$	$r_s = 0.00$ $p = 0.99$	$r_s = 0.16$ $p = 0.43$	$r_s = 0.06$ $p = 0.77$	$r_s = 0.02$ $p = 0.90$
Schwungzeit	$r_s = -0.04$ $p = 0.83$	$r_s = -0.05$ $p = 0.81$	$r_s = -0.05$ $p = 0.80$	$r_s = 0.28$ $p = 0.17$	$r_s = -0.08$ $p = 0.72$	$r_s = -0.17$ $p = 0.41$	$r_s = -0.23$ $p = 0.28$	$r_s = -0.18$ $p = 0.38$	$r_s = -0.20$ $p = 0.33$	$r_s = -0.18$ $p = 0.37$	$r_s = 0.15$ $p = 0.45$	$r_s = 0.00$ $p = 0.97$	$r_s = -0.19$ $p = 0.35$	$r_s = -0.06$ $p = 0.77$	$r_s = -0.10$ $p = 0.60$
Integral	$r_s = 0.07$ $p = 0.73$	$r_s = 0.26$ $p = 0.19$	$r_s = 0.23$ $p = 0.26$	$r_s = 0.09$ $p = 0.64$	$r_s = 0.45$ $p = 0.019$	$r_s = 0.45$ $p = 0.02$	$r_s = 0.04$ $p = 0.86$	$r_s = 0.30$ $p = 0.13$	$r_s = 0.28$ $p = 0.15$	$r_s = -0.07$ $p = 0.71$	$r_s = 0.22$ $p = 0.26$	$r_s = 0.17$ $p = 0.39$	$r_s = 0.18$ $p = 0.37$	$r_s = 0.21$ $p = 0.29$	$r_s = 0.16$ $p = 0.43$
Maximallast	$r_s = 0.21$ $p = 0.29$	$r_s = 0.20$ $p = 0.33$	$r_s = 0.10$ $p = 0.61$	$r_s = 0.04$ $p = 0.81$	$r_s = 0.31$ $p = 0.11$	$r_s = 0.31$ $p = 0.11$	$r_s = -0.02$ $p = 0.93$	$r_s = 0.13$ $p = 0.53$	$r_s = 0.14$ $p = 0.47$	$r_s = 0.00$ $p = 0.99$	$r_s = 0.15$ $p = 0.46$	$r_s = 0.05$ $p = 0.81$	$r_s = 0.05$ $p = 0.79$	$r_s = 0.16$ $p = 0.44$	$r_s = 0.14$ $p = 0.47$
Zyklusdauer	$r_s = -0.13$ $p = 0.54$	$r_s = 0.17$ $p = 0.40$	$r_s = 0.21$ $p = 0.30$	$r_s = 0.29$ $p = 0.14$	$r_s = -0.70$ $p = 0.0001$	$r_s = -0.71$ $p = 0.001$	$r_s = 0.32$ $p = 0.12$	$r_s = -0.63$ $p = 0.001$	$r_s = -0.58$ $p = 0.003$	$r_s = -0.08$ $p = 0.69$	$r_s = -0.14$ $p = 0.50$	$r_s = -0.06$ $p = 0.76$	$r_s = -0.34$ $p = 0.08$	$r_s = -0.19$ $p = 0.33$	$r_s = -0.17$ $p = 0.39$
Kadenz	$r_s = 0.12$ $p = 0.55$	$r_s = -0.17$ $p = 0.40$	$r_s = -0.22$ $p = 0.29$	$r_s = -0.40$ $p = 0.049$	$r_s = 0.66$ $p = 0.0003$	$r_s = 0.67$ $p = 0.001$	$r_s = -0.32$ $p = 0.12$	$r_s = 0.64$ $p = 0.001$	$r_s = 0.58$ $p = 0.03$	$r_s = 0.08$ $p = 0.70$	$r_s = 0.13$ $p = 0.54$	$r_s = 0.06$ $p = 0.79$	$r_s = 0.37$ $p = 0.06$	$r_s = 0.19$ $p = 0.33$	$r_s = 0.17$ $p = 0.40$
Doppelstützzeit	$r_s = 0.03$ $p = 0.89$	$r_s = -0.23$ $p = 0.26$	$r_s = -0.08$ $p = 0.71$	$r_s = 0.03$ $p = 0.90$	$r_s = -0.29$ $p = 0.16$	$r_s = -0.47$ $p = 0.017$	$r_s = 0.16$ $p = 0.43$	$r_s = -0.46$ $p = 0.02$	$r_s = -0.37$ $p = 0.07$	$r_s = 0.02$ $p = 0.91$	$r_s = -0.51$ $p = 0.01$	$r_s = -0.41$ $p = 0.036$	$r_s = -0.15$ $p = 0.46$	$r_s = -0.42$ $p = 0.03$	$r_s = -0.27$ $p = 0.18$

Abb. 16: Spearman Korrelationsmatrix zwischen Gangparametern und Outcome

4. Ergebnisse

Die Gangaufgabe des Treppenaufstiegs zeigte positive Korrelationen zwischen klinischen Scores und Standzeit (OMS: $r_s = 0.46$, $p < 0.05$) (Abb. 18), Belastungsintegral (AOFAS: $r_s = 0.45$, $p < 0.05$; OMS: $r_s = 0.45$, $p < 0.05$) und Kadenz (AOFAS: $r_s = 0.66$, $p < 0.05$; OMS: $r_s = 0.67$, $p < 0.05$). Folglich ist ein besserer klinischer Score mit einem flüssigeren und schnellerem Gangbild assoziiert. Negative Korrelationen zeigten sich beim Treppenaufstieg zwischen klinischen Scores und Gangzyklusdauer (AOFAS: $r_s = -0.70$, $p < 0.05$; OMS: $r_s = -0.71$, $p < 0.05$) und Doppelstützzeit (OMS: $r_s = -0.47$, $p < 0.05$). Dies bedeutet, dass ein schlechterer klinischer Score mit einem kürzeren und unregelmäßigerem Gangbild statistisch zusammenhängt. Weitere negative Korrelationen bestanden sowohl zwischen radiografischem Outcome und Kadenz ($r_s = -0.46$; $p < 0.05$), als auch zwischen radiografischem Outcome und Standzeit ($r_s = -0.50$; $p < 0.05$). Somit ist ein schlechteres radiographisches Outcome (gemessen mit dem Bargon Score) mit einer kürzeren Belastungszeit der betroffenen Extremität assoziiert.

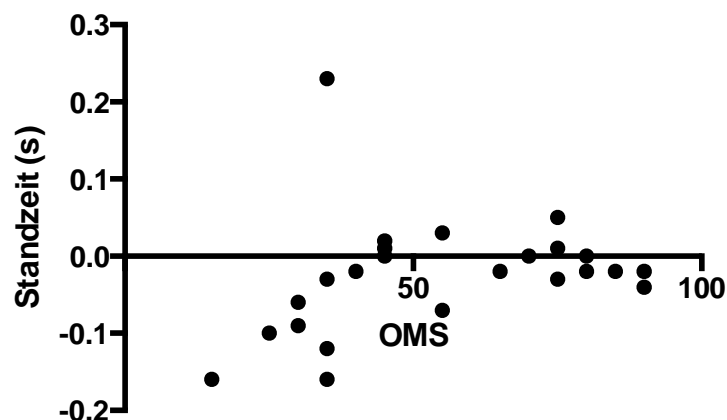


Abb. 18: Korrelation des Olerud-Molander Scores mit der Standzeit beim Treppenaufstieg

Beim Treppenabstieg zeigten sich negative Korrelationen zwischen Gangzyklusdauer und klinischen Scores (AOFAS: $r_s = -0.63$; $p < 0.05$; OMS: $r_s = -0.58$; $p < 0.05$) (Abb. 19), und zwischen Doppelstützzeit und klinischen Scores (AOFAS: $r_s = -0.46$; $p < 0.05$). Folglich ist auch bei dieser Gangaufgabe ein schlechter klinischer Score mit einem kürzeren und unregelmäßigeren Gangzyklus verbunden.

Positive Korrelationen bestanden zwischen Kadenz und beiden klinischen Scores (AOFAS: $r_s = 0.64$; $p < 0.05$; OMS: $r_s = 0.58$; $p < 0.05$). Somit korreliert ein höherer klinischer Score mit einer höheren Anzahl von vollständigen Schrittzyklen, was ein besseres und flüssigeres Gangbild darstellt.

4. Ergebnisse

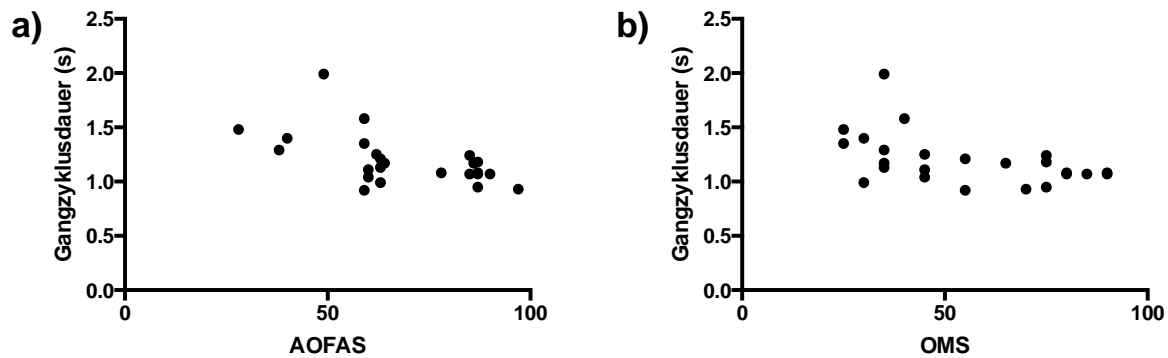


Abb. 19: Korrelationen des AOFAS Scores (a) und des Olerud-Molander Scores (b) mit der Gangzyklusdauer beim Treppenabstieg

Beim Laufen auf ansteigender Schräge ergaben sich eine positive Korrelation zwischen medio-lateraler Ganglinienlänge und dem AOFAS Score ($r_s = 0.41$; $p < 0.05$) (Abb. 20), sowie eine negative Korrelation zwischen der Doppelstützzeit und beiden klinischen Scores (AOFAS: $r_s = -0.51$; $p < 0.05$; OMS: $r_s = -0.41$; $p < 0.05$). Diese Korrelationen sind ebenfalls Ausdruck für ein schlechteres Gangbild bei schlechteren klinischen Scores. Eine verminderte Doppelstützzeit besagt, dass die Phase des Gangzyklus, in der beide Füße gemeinsamen Bodenkontakt haben, kürzer ist. Somit ist dies ein Indiz für einen insgesamt instabileren Gang bei schlechterem funktionellen Outcome.

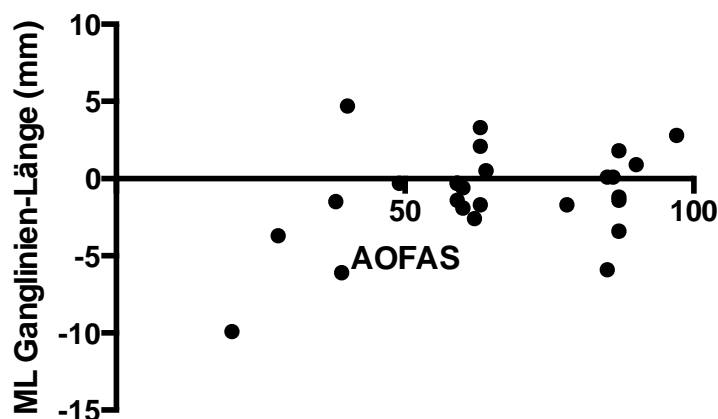


Abb. 20: Korrelation des AOFAS Scores mit der medio-lateralen Ganglinien-Länge beim Laufen auf ansteigender Schräge

4. Ergebnisse

Laufen auf abfallender Schräge ergab lediglich eine signifikante negative Korrelation zwischen Doppelstützzeit und AOFAS Score ($r_s = -0.42$; $p < 0.05$) (Abb. 21). Diese Beobachtung ist Analog zu der verminderten Doppelstützzeit beim Gehen auf ansteigender Schräge. Auch hier ist die verminderte Doppelstützzeit Ausdruck eines unregelmäßigen und instabilen Gangbildes.

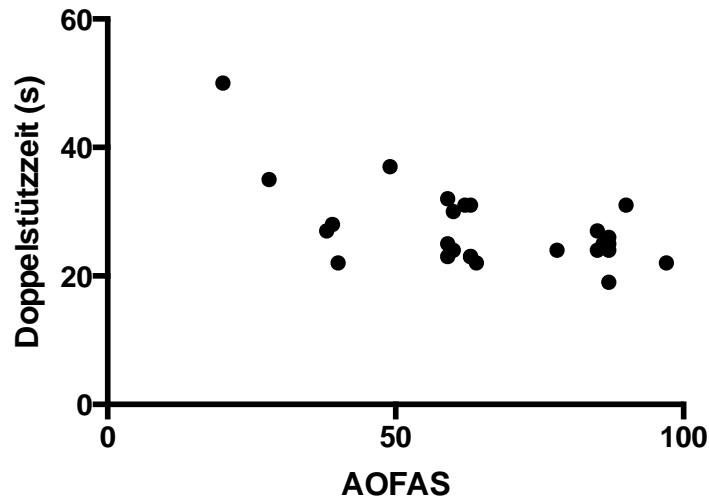


Abb. 21: Korrelation des AOFAS Scores mit der Doppelstützzeit beim Laufen auf abfallender Schräge

Bei der Analyse der Sensoren des Rückfußes konnte kein Unterschied im Mittleren Druck zwischen gesunder und verletzter Seite festgestellt werden (gesund: $11.07 \pm 1.4 \text{ N/cm}^2$ vs. Verletzt: $10.52 \pm 1.6 \text{ N/cm}^2$, $p=0.09$). Somit ist bei alleiniger Betrachtung des Maximaldrucks des Rückfußes keine signifikante Veränderung zwischen gesunder und verletzter Extremität zu sehen.

4. Ergebnisse

Signifikante medio-laterale Druckdifferenzen zwischen gesunder und zuvor verletzter Seite bestanden für Vor- und Rückfuß separat (Vorfuß gesund: $0.35 \pm 1.0 \text{ N/cm}^2$ vs. verletzt: $1.08 \pm 0.9 \text{ N/cm}^2$, $p < 0.05$; Rückfuß gesund: $0.09 \pm 0.9 \text{ N/cm}^2$ vs. verletzt: $0.94 \pm 1.0 \text{ N/cm}^2$, $p < 0.05$) (Abb. 22 a). Sowohl im Vor- als auch im Rückfuß bestehen somit deutliche Lateralisationen der Gangachse.

Eine signifikante Drucklateralisation für Frakturen mit initialer subtalarer Dislokation (Marti Weber III, IV) konnte gezeigt werden (medio-laterale Differenz gesund: $0.51 \pm 1.1 \text{ N/cm}^2$ vs. verletzt: $1.09 \pm 0.9 \text{ N/cm}^2$, $p = 0.09$) (Abb. 22 b). Folglich führt eine initial höhergradig dislozierte Fraktur zu einer stärkeren Lateralisation der Gangachse.

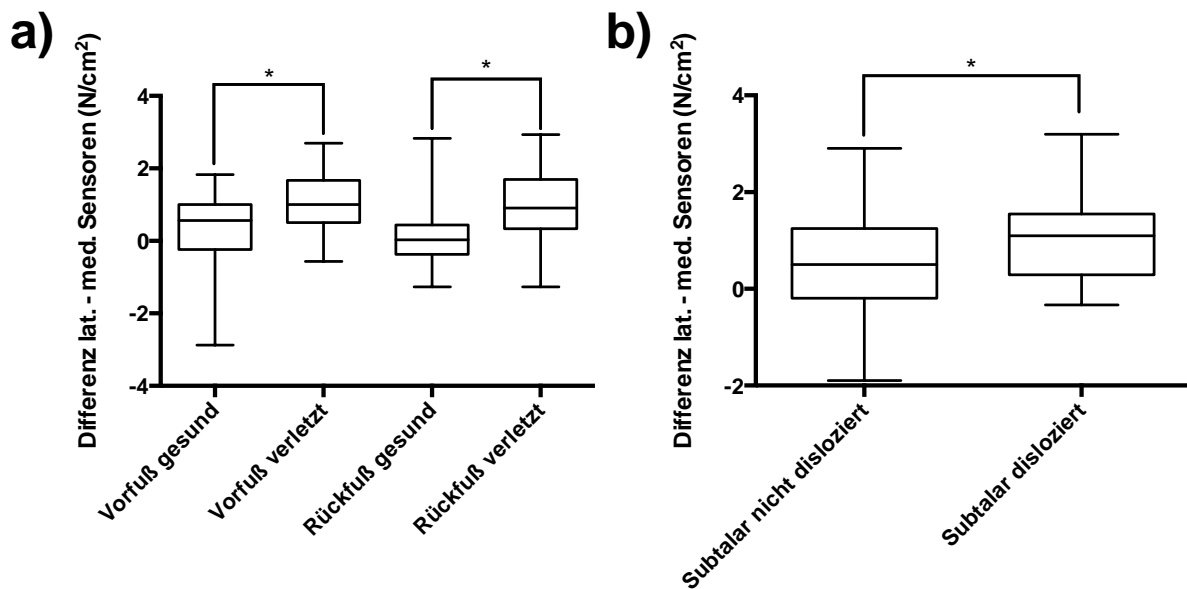


Abb. 22: Box plots der Werte für die medio-lateralen Druckdifferenzen für Vor- und Rückfuß a) im Vergleich von gesunder zu verletzter Extremität, b) im Vergleich von subtalar dislozierten zu subtalar nicht dislozierten Frakturen

4. Ergebnisse

Keine Korrelationen zwischen medio-lateralen Druckunterschieden für sowohl Vor- als auch Rückfuß ergaben sich für den Bargon Score (Abb. 23 a), AOFAS Score (Abb. 23 b), Olerud-Molander Score (Abb. 23 c) und die Marti Weber Klassifikation (Abb. 23 d). Somit kann bei isolierter Betrachtung der Ergebnisse der klinischen Scores, der Marti-Weber Klassifikation und des radiologischen Bargon Scores nicht auf Grund der Lateralisation auf das Outcome geschlossen werden.

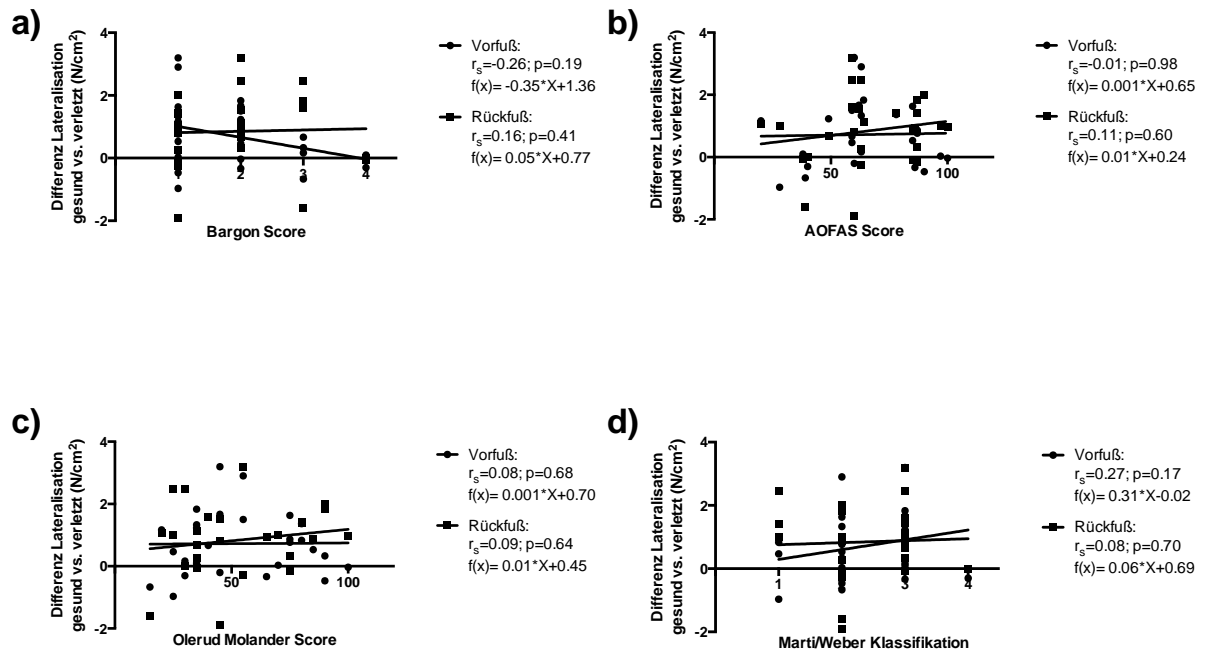


Abb. 23: Differenz der Ganglinienlateralisation von gesunder zu verletzter Extremität im Verhältnis zu a) Bargon Score, b) AOFAS Score, c) Olerud-Molander Score, d) Marti/Weber Klassifikation

5. Diskussion

Im Rahmen dieser Studie wurden erstmals die Langzeitveränderungen im Gangbild nach Talusfrakturen untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen chronische Veränderungen von kinetischen und temporospatialen Parametern im Gangbild mit einer Lateralisation der Gangachse vor allem im Mittel- und Rückfuß. Patienten mit langem follow up belasten die betroffene Extremität weniger. Die dynamische Pedobarographie zeigte deutliche Assoziationen zwischen Gangbild und Outcome: So hängt ein niedriger klinischer Score mit einem schlechten und instabilen Gangbild zusammen. Dies drückt sich durch ein vermindertes Belastungsintegral, eine verminderte Maximallast und eine erhöhte Schwungzeit auf der betroffenen Seite, sowie eine erhöhte Standzeit auf der gesunden Seite aus.

Insgesamt lassen sich daraus Empfehlungen für die operative Therapie und Langzeitnachbehandlung ableiten, die es zukünftig in prospektiven, interventionellen Studien zu beweisen gilt.

5.1 Zusammensetzung des Patientenkollektivs

Es wurden Patienten mit verschiedenen Frakturtypen und verschiedenen osteosynthetischen Versorgungstechniken kombiniert um eine adäquate Zahl an Studienteilnehmern zu gewährleisten. Somit ist mit n=27 eine für Talusfrakturen repräsentative Zahl erreicht worden. Im Vergleich zu anderen Fraktorentitäten muss in Betracht gezogen werden, dass Talusfrakturen nur etwa 0,5% aller Frakturen ausmachen und damit extrem rar sind^{11,41}. Dies belegt auch die Zahl von insgesamt 61 Talusfrakturen zwischen 2002 und 2015 in der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes. Studien mit größeren Kohorten bei diesen Typen von Frakturen sind sehr selten^{8,13,40}. Weiterhin war das durchschnittliche follow up mit 78,3 Monaten (range 21 – 150) zwar inhomogen bezüglich der range, jedoch ist ein solch langer Nachbeobachtungszeitraum bei Talusfrakturen selten und somit eine Ausnahme in der aktuellen Literatur^{2,20}.

Die häufigsten Mechanismen, die zu Talusfrakturen führen sind Stürze aus großer Höhe und Verkehrsunfälle⁴⁹. Wegen den hohen einwirkenden Kräften entstehen sie oftmals zusammen mit anderen Verletzungen der unteren Extremität⁴⁷. Studien haben keinen signifikanten Einfluss von zusätzlichen Verletzungen der unteren Extremität auf das Outcome zeigen

5. Diskussion

können⁵⁵, woraus sich schließen lässt, dass Talusfrakturen der entscheidende Faktor bei der Beeinflussung des Outcomes sind. In unserer Studie waren ebenfalls Stürze (56%) und Verkehrsunfälle (30%) die Hauptursachen der Talusfrakturen. Acht Patienten präsentierten sich mit zusätzlichen Verletzungen der unteren Extremität. Auch in unserer Arbeit zeigte sich analog zur bekannten Literatur keine signifikante Beeinflussung des Outcomes durch die Begleitverletzungen, sodass diese Patienten in die Studie eingeschlossen wurden.

Es wurde keine Korrelation zwischen Outcome und Alter oder Outcome und follow-up Zeit beobachtet, wodurch unsere Ergebnisse nahelegen, dass Alter und follow-up Zeit, sofern diese über 21 Monaten liegt, ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf das Langzeitergebnis nach Talusfrakturen haben. Unabhängig von den Begleitverletzungen sind die Langzeitergebnisse nach Talusfrakturen von hohen Raten an Osteonekrosen³³ und Arthrosen der peritalaren Gelenke⁴⁰ geprägt. Die Raten an avaskulären Knochennekrosen (37%) und Arthrosen (52%), sowie das generelle klinische Outcome in unserer Studie sind mit den Raten in anderen Studien vergleichbar²⁰ (siehe 5.2).

5.2 Klinisch radiologische Ergebnisse

Beim follow up präsentierten sich 14 Patienten (52%) mit radiologischen Zeichen einer Arthrose. Bei acht Patienten (30%) waren eindeutige Zeichen von Talusnekrosen nachweisbar. Canale und Kelly et al. beschreiben bei einem Patientenkollektiv von 71 Patienten und einem follow up von 12,7 Jahren eine Rate an avaskulären Knochennekrosen von 52 Prozent⁹. Dabei differenzieren sie deren Häufigkeit weiter anhand der Hawkins-Klassifikation der initialen Fraktur. Bei Frakturen vom Hawkins Typ 1 beschreiben sie die Rate an avaskulären Knochennekrosen als sehr selten. Die Ursache darin wird an der Verletzung nur eines der drei den Talus versorgenden Blutgefäße gesehen. Bei Hawkins Typ 2 Frakturen hingegen steigt die Rate an avaskulären Knochennekrosen auf etwa 50%, da bei dieser Art von Frakturen zwei bis drei der Blutgefäße geschädigt werden. Folglich steigt die Rate an avaskulären Knochennekrosen bei Hawkins Typ 3 Frakturen auf über 90%, da bei diesem Frakturtyp alle drei Blutgefäße geschädigt werden. Bei den sehr seltenen Hawkins Typ 4 Frakturen verhält sich dies analog, da ebenfalls alle Blutgefäße geschädigt werden. Durch deren Seltenheit (bei Canale, Kelly et al. nur zwei Fälle; in unserer Studie kein Fall) kann jedoch keine statistisch signifikante Aussage getroffen werden. Die Tendenz, dass mit steigender Frakturschwere (höhere Hawkins-Klassifikation) die Rate an avaskulären Knochennekrosen steigt, hat sich in

5. Diskussion

unsere Studie ebenfalls gezeigt, wenngleich in unserer Arbeit der Anteil insgesamt niedriger lag. Dies mag zum einen an dem in unserer Arbeit kürzeren follow up liegen, mitunter aber auch am insgesamt jüngeren Alter unserer Studie. Die in diesem Zeitraum erfolgten osteosynthetischen Weiterentwicklungen könnten zu einem insgesamt besseren Outcome beigetragen haben. Dies ist im Einklang mit weiteren Arbeiten aus der aktuellen Literatur:

So wiesen Fournier et al. bei 114 Patienten und einem Nachbeobachtungszeitraum von zwei Jahren eine Nekroserate von 34 Prozent und eine Arthroserate von 74 Prozent nach ¹³. Dabei beschreiben sie eine höhere Arthroserate bei höhergradig dislozierten Frakturen. In unserer Studie sind ebenfalls höhergradig dislozierte Frakturen, sowie subtalare Verletzungen mit einer höheren Arthroserate assoziiert. Dies liegt vermutlich an der Schwere der Verletzung die bei höherer Dislokation größer ist und somit mehr Residuen zurück lässt. Auch erfordern diese schwer dislozierten Frakturen meist eine höhere, einwirkende Kraft, die zusätzlich den subtalaren Knorpel schädigt, ohne dass dieser intraoperativ vollständig beurteilbar wäre. Frawley et al. zeigten bei 26 Patienten über einen Zeitraum von 9 Jahren eine Nekroserate von 15 Prozent und eine Rate an posttraumatischer Arthrose von 61 Prozent ¹⁵. Durch alle diese Studien, inklusive unserer, wird somit das hohe Risiko von posttraumatischen Arthrosen und avaskulären Knochennekrosen nach Talusfrakturen bestätigt. Weiterhin besteht Einigkeit über den Einfluss der initialen Frakturschwere und Dislokation auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Spätfolgen ^{9,13,15}.

Signifikante Korrelationen wurden zwischen der initialen Marti Weber und Hawkins Klassifikation zum Bargon Score gesehen (Marti Weber: $r_s=0.50$, $p<0.05$; Hawkins: $r_s=0.67$, $p<0.05$). Die Arthroseraten waren nur moderat mit dem Olerud-Molander Score korreliert. Höhere Korrelationen zum Olerud-Molander Score wurden bezüglich der initialen Frakturklassifikation von Taluskörper- und vor allem Talushalsfrakturen gesehen. Diese Assoziation von Outcome zu klinischen Scores, mit der höheren Korrelation zu insbesondere Talushalsfrakturen, wurde bereits in vorherigen Studien gezeigt ⁴⁹. Die Erklärung darin liegt vermutlich in der prekären Vaskularisation des Korpus über den Talushals. Mit Verletzung und entsprechender Dislokation des Talushalses kommt es zu einer Unterbrechung der Hauptgefäßversorgung, die eine Nekrose begünstigt ^{20,33}. Zusätzlich können diese Frakturen auf Grund Ihres Ausmaßes eine zusätzliche intraoperative Osteotomie des Innenknöchels benötigen, die die verbliebene Blutversorgung über die A. deltoidea noch weiter kompromittieren kann.

Insgesamt sind die radiographischen Ergebnisse nach Talusfrakturen mit der initialen Frakturschwere korreliert, wohingegen jedoch nur eine schwache Korrelation zwischen

5. Diskussion

Arthrosegrad und klinischer Funktion besteht. Die schwache Korrelation des Arthrosegrades zur klinischen Funktion scheint zunächst überraschend. Denn folglich sind selbst Patienten mit einer hochgradigen Arthrose der subtalaren Gelenke in ihrer Funktion nicht so stark eingeschränkt, wie dies etwa anhand des radiologischen Befundes zu erwarten wäre. Diese Beobachtung korreliert mit den Ergebnissen der aktuellen Literatur. Rammelt und Zwipp beschreiben die posttraumatische Arthrose als in einigen Fällen asymptomatisch⁴⁹. Eine klare Assoziation von initialer Frakturklassifikation und Arthrose konnte in weiteren Studien ebenfalls nicht nachgewiesen werden^{28,61,62}. Wobei die frakturbedingte Pseudoarthrose des Talushalses als schwerwiegende und präarthrotische Veränderung gewertet wird, die in schweren Fällen eine Arthrodesen der betroffenen Gelenke notwendig macht^{12,29,48}. Somit lässt sich vermuten, dass die Arthrose der subtalaren Gelenke klinisch unauffällig als sogenannte „stumme Arthrose“ verlaufen kann. Dies erklärt die in unserer Studie nur schwache Korrelation zur klinischen Funktion.

Weiterhin haben Fournier et al. nachgewiesen, dass das Vorhandensein von Osteonekrosen nach Talusfrakturen ebenfalls nicht zwangsläufig mit einem schlechten klinischen Ergebnis einhergeht¹³. In der Studie von Fournier et al. sind 59% der Patienten mit Osteonekrosen asymptomatisch. Avaskuläre Osteonekrosen nach Talusfrakturen sind durch die Verletzung der zuführenden Blutgefäße zu Talushals und Taluskörper zu erklären⁴⁹. Deshalb steigt die Rate an avaskulären Knochennekrosen mit dem initialen Grad der Dislokation^{20,33}. Dabei hängt das Beschwerdeausmaß vom Umfang der Osteonekrose ab⁴⁹. Schuind et al. wiesen bei 42% ihrer Patienten eine asymptomatische, bei 37% eine fortschreitende Osteonekrose und bei 21% eine innerhalb von zwei Jahren komplette Revaskularisation der Osteonekroseherde nach^{49,56}. Da das Follow-up in unserer Studie mit 78,3 Monaten deutlich über zwei Jahren liegt ist von einer gewissen spontanen Revaskularisation kleinerer Osteonekroseherde auszugehen. Auch wurde in unserer Studie nur konventionell radiologische Bildgebung genutzt, die insgesamt eine höhere Detektionsschwelle für Osteonekrosen hat. Studien, die eine MRT zur Nachkontrolle durchführen werden daher erwartungsgemäß höhere Nekroserate aufweisen. Dadurch ist die in unserer Studie insgesamt niedrige Rate an symptomatischen Osteonekrosen zu erklären.

Eine denkbare Fragestellung für weitere prospektive Studien wäre es, Patienten mit schwerer subtalarer Arthrose unterschiedlicher Genese (wie etwa nach Calcaneusfrakturen oder Pilon Tibiale Frakturen) mit Patienten mit subtalarer Arthrose nach Talusfrakturen bezüglich des klinischen Outcomes zu vergleichen. Dadurch könnte die klinische Bedeutung der subtalaren Arthrose für die Funktion des Fußes genauer analysiert werden.

5.3 Vergleich mit anatomisch nahen Frakturentitäten

Studien naher Frakturentitäten mit langem follow up (Pilon Tibiale Frakturen, Calcaneusfrakturen) haben bereits stark veränderte Gangbilder nach diesen Verletzungen gezeigt. Jansen et al. haben bei 35 Patienten Langzeitveränderungen in kinetischen und temporospatialen Parametern bei Pilon Tibiale Frakturen gezeigt²⁶. Dabei stellten sie eine positive Korrelation von initialer Frakturschwere und dem Auftreten von posttraumatischer Arthrose dar. Weiterhin konnte eine Lateralisation der Gangachse festgestellt werden, die mit dem klinischen Outcome korreliert war²⁶. Ähnliche Resultate wurden von diversen Gruppen für den Calcaneus gezeigt^{17,24,27}. Hirschmüller et al. zeigten bei 60 Patienten mit unilateralen Calcaneusfrakturen eine Einschränkung der ROM und eine Druckreduktion im Hinterfuß, sowie eine Drucksteigerung mit Lateralisation im Mittel- und Vorfuß. Daraus leiten sie die Wichtigkeit der Wiederherstellung der vollen Muskelkraft und der Propriozeption in der postoperativen Rehabilitation ab²⁴. Weiterhin schlussfolgern sie die Notwendigkeit bei frührehabilitativen Maßnahmen einen Schwerpunkt auf sensomotorisches Training zu legen²⁴. Jansen, Frey et al. wiesen bei 26 Patienten mit Calcaneusfrakturen ebenfalls eine Drucksteigerung im Mittelfuß mit Lateralisation der Ganglinie nach²⁷. Sie postulieren, dass pedobarographiegestützte Physiotherapie und personalisierte Orthesen, potentiell die pathologischen Druckverteilungsmuster minimieren und frühe und späte klinische Ergebnisse verbessern können²⁷. Genc et al. stellten bei 28 Patienten mit operativ versorgten Calcaneusfrakturen eine Lateralisation der Druckverteilung im Rückfuß fest¹⁷. Somit ist zusammenfassend bei all diesen Frakturentitäten eine Lateralisation der Gangachse mit einer Verminderung des Maximaldrucks der verletzten Extremität und positiver Korrelation der Frakturschwere mit dem klinischen Outcome nachgewiesen.

Diese für Calcaneus und Pilon Tibiale Frakturen dargestellten Ergebnisse ließen schon vor Studienbeginn Schlüsse auf ähnliche Veränderungen im Gangbild bei Talusfrakturen zu. Diese Vermutungen wurden in dieser Studie bestätigt. Die Maximallast und das Belastungsintegral waren bei allen Gangaufgaben vermindert. Eine Lateralisation der Gangachse wurde sowohl im Rück- als auch im Vorfuß nachgewiesen. Weiterhin sind höhergradig dislozierte Frakturen mit einer höheren Lateralisation der Gangachse und einer höheren Rate an avaskulären Knochennekrosen und posttraumatischen Arthrosen assoziiert. Ein besseres klinisches Ergebnis ist hingegen mit einem höheren Funktionsscore korreliert. Somit gehen alle diese Frakturen mit funktionellen Beeinträchtigungen im Gangbild einher. Die verminderte Maximallast und das reduzierte Belastungsintegral sind vermutlich auf die

5. Diskussion

Spätfolgen, wie Nekrosen und Arthrosen zurückzuführen. Die, bei allen diesen Frakturentitäten nachgewiesene, Lateralisation der Gangachse kommt durch eine verminderte Beweglichkeit der subtalaren Gelenke zustande⁵⁴. Die dadurch eingeschränkte Eversionsbewegung wird vor allem in der Phase zwischen initialem Rückfußkontakt und Vollkontakt des Fußes benötigt. Durch die verminderte Eversion rotiert der Talus schlechter gegenüber dem Kalkaneus und zwingt den Fuß in eine invertierte Position^{42,45}. Somit wird mehr Last auf den lateralen Fußrand übertragen. Als Konsequenz ergibt sich daraus ein instabileres und inhomogenes Gangbild, das zu chronischer Fehlbelastung des Fußes und der gesamten betroffenen unteren Extremität führen kann⁵⁸. Dies kann Ursache für Schmerzen sowohl im Fuß als auch der betroffenen Extremität sein. Die höhere Komplikationsrate bei komplexeren Frakturen ist mit der Verletzung mehrerer Strukturen (wie etwa Blutgefäßen) bei komplexen Verletzungen zu erklären⁹.

5.4 Diskussion des prädiktiven Werts

Diskussion der Methodik

Die Gangbildanalyse stellt ein in der klinischen Breitenversorgung nur selten genutztes und mitunter unterschätztes Tool zur Evaluation von Verletzungen dar^{4,7,10}. Die aufwendige Durchführung und das benötigte Equipment sind dabei oftmals Hürden zur Umsetzung solcher Studien^{7,27,52}. Durch die Nutzung der “OpenGo Sohle” (Moticon GmbH; München, Deutschland) wurde der Bedarf an Spezialequipment und die Komplexizität (Laborgebundenheit und Kosten), bei gleichbleibender Qualität und Validität, minimiert^{7,37,60}.

Vorteile der Ganganalyse stellen dabei die fehlende Invasivität des Verfahrens und die große Menge an erhobenen Daten in einem vergleichsweise kurzen Zeitintervall dar^{4,10,50}. Nachteil ist die ungewohnte Testsituation für den Patienten, die zu eventueller Verzerrung der Ergebnisse führen kann^{4,6,10}. In diesem Rahmen ist es zu Studienzwecken üblich, den Patienten eine selbstgewählte Eingewöhnungszeit an die Messinstrumente und Gangsituationen vorab zu ermöglichen, um diesen Effekt weitestgehend auszugleichen^{4,17,26}. Dies wurde in unsere Studie ebenfalls so gehandhabt.

Der Gangparcours wurde anhand der wahrscheinlichen Bedürfnisse der Patienten gewählt. Potter et al. untersuchten Ganggeschwindigkeit und deren Korrelation zu Aktivitäten des täglichen Lebens in geriatrischen Patienten⁴⁴. Adkin et al. untersuchten die Oberkörper Exkursionsbewegungen bei verschiedenen Gangaufgaben bei Parkinson Patienten¹ und Haggard et al. die Auswirkungen von kognitiven Aufgaben auf das Gangbild bei neurologischen Patienten¹⁹. Aus den in diesen Studien genutzten Gangaufgaben schlossen wir auf die im Alltag für unsere Patienten am meisten zu bewältigenden Gangaufgaben (Ebene, aufsteigende/abfallende Schräge und Treppen auf/abstieg). Durch die Wahl des mobilen Gangbildanalyse Systems konnten die Patienten weiterhin in einer ihrem Alltag näheren Situation untersucht werden, als dies etwa mit einem stationären System (z.B. Kraftmessplatte) möglich gewesen wäre.

Zur weiteren Beurteilung der Beeinträchtigung der Patienten wurden klinische Scores (AOFAS Score, Olerud-Molander Score) hinzugezogen. Der 1984 von Olerud und Molander entwickelte und validierte Score³⁸ wurde als primärer Test mit den Patienten durchgeführt. Zur weiteren Evaluation wurde der AOFAS Score hinzugezogen. Dieser ist zwar nicht in gleichem Umfang validiert, wird jedoch in der Praxis oft benutzt und wurde deshalb hier als zusätzlicher Score gewählt³⁶.

5. Diskussion

Die Frakturen wurden, wie in der Literatur und Praxis üblich, nach Hawkins und Marti und Weber klassifiziert ^{18,21,47} und der Arthrosegrad nach Bargon anhand der Radiologischen Bilder beurteilt ⁵.

Diese Verfahren gelten in der aktuellen Literatur als Standard ^{2,9,13,20,47,49} und wurden deshalb in dieser Studie angewendet.

Diskussion der Ergebnisse

Der Vergleich von verletzter und gesunder Extremität zeigt einige charakteristische Veränderungen im Gangbild. Am auffälligsten waren das während allen Gangaufgaben verminderte Belastungsintegral und die verminderte Maximallast auf der zuvor frakturierten Extremität. Dies zeigt, dass trotz des langen follow ups, Patienten die auf die verletzte Extremität aufgebrachte Last reduzieren und somit bleibende Residuen aufweisen. Da fast alle Patienten, nach Auswertung der Scores, eine gewisse funktionelle Beeinträchtigung aufwiesen, war dieser Umstand bereits zu Studienbeginn zu erwarten. Die Schwere der funktionellen Beeinträchtigung nach Talusfrakturen wurde bereits in vorherigen Studien gezeigt ^{20,55}. Sanders et al. beschreiben dabei vor allem eine Achsfehlstellung nach Fraktur und subtalare Arthrosen als Hauptursachen für ein schlechtes Outcome ⁵⁵. In einer Metaanalyse von Halvorson et al. bezüglich Talushalsfrakturen werden frakturbedingte Pseudoarthrosen, Achsfehlstellungen, benötigte zweite Operationen, die initiale Frakturschwere und das Auftreten von Knochennekrosen und posttraumatischen Arthrosen als Kriterien für ein schlechtes klinisches Outcome genannt ²⁰. In unserem Patientenkollektiv weisen Patienten mit avaskulären Knochennekrosen und posttraumatischen Arthrosen, sowie mit subtalaren Verletzungen ebenfalls ein schlechteres klinisches Outcome auf.

Bei 3 der 5 Gangaufgaben war die Standzeit auf der vorher verletzten Seite reduziert. Stand- und Schwungzeit, sowie Ganggeschwindigkeit sind mit der generellen Funktion des Fußes assoziiert ⁴³. Eine höhere Ganggeschwindigkeit korreliert dabei mit einer besseren Funktion und somit einem besseren klinischen Outcome nach der Fraktur ⁴³. Bei Schmerzen im Fuß ist die Standzeit des verletzten Fußes vermindert um die Belastung des Fußes zu reduzieren und die Schmerzen zu kompensieren ³¹. Das dadurch entstehende Gangbild wird als antalgischer Gang bezeichnet ³¹. Weiterhin verschlechtern Schmerzen im Fuß die gesundheitsbezogene Lebensqualität und führen bei älteren Patienten zu einem erhöhten Sturzrisiko ³⁴. Bei einer Muskelhypotrophie im Fußbereich oder einer veränderten Fußbiomechanik ist die Standzeit hingegen kompensatorisch verlängert ³¹. Die in unserer Studie verminderten Standzeiten und

5. Diskussion

Ganggeschwindigkeiten sind somit mit einer eingeschränkten generellen Funktion des Fußes assoziiert. Durch die Reduktion von Standzeit und Maximallast wird insgesamt weniger Gewicht über einen kürzeren Zeitraum auf die verletzte Extremität aufgebracht. Das Gangbild wird dadurch instabil und inhomogen.

Interessanter Weise wurden keine signifikanten Veränderungen zwischen verletzter und gesunder Seite bezüglich antero-posteriorer COP Schwankung beobachtet, was darauf schließen lässt, dass die Abrollbewegungen beider Seiten ähnlich sind. Die medio-laterale COP Schwankung war jedoch beim Treppenaufstieg und Bergabgehen erniedrigt und beim Treppenabstieg erhöht. Die medio-laterale Druckmittelpunktsschwankung während der Standphase ist durch die Muskelaktivität bedingt, die nötig ist um die Körperhaltung aufrecht zu erhalten⁴. Verminderte medio-laterale COP-Schwankungen bedeuten eine verminderte Muskelaktivität und somit eine höhere Grundstabilität der Körperhaltung. Die bei diesen Gangaufgaben reduzierten medio-lateralen COP-Schwankungen sind jedoch mit einer reduzierten Standzeit assoziiert. Die dadurch verminderte Kontaktzeit mit dem Untergrund benötigt weniger muskuläre Aktivität und generiert somit eine geringere COP-Schwankung. Beim Treppenabstieg, der mit hoher Kraftereinwirkung einhergeht, sind die Standzeiten zwischen beiden Extremitäten vergleichbar. Um bei dieser schwierigen Gangaufgabe die Körperhaltung aufrecht zu erhalten, muss mehr Muskelkraft aufgebracht werden und die medio-laterale COP-Schwankung wird größer. Die größere medio-laterale COP-Schwankung ist somit Ausdruck für eine Instabilität der Körperhaltung.

Beim Vergleich von Gangparametern zum Outcome wurden verschiedene moderate Assoziationen, abhängig von der Gangaufgabe, beobachtet. Beim Gehen auf ebener Fläche und ansteigender Schräge waren größere antero-posteriore und medio-laterale COP-Schwankungen mit besseren klinischen Ergebnissen assoziiert. Die antero-posteriore COP-Schwankung ist ein Maß für die Flüssigkeit der Standphase beim normalen Gang. Sie wird dazu benutzt einseitig beeinträchtigte Gangbilder zu analysieren, wobei eine größere antero-posteriore COP-Schwankung und Ganglinienlänge auf ein physiologisches Gangbild hindeuten^{23,53}. Dementsprechend haben Patienten mit einem besseren klinischen Outcome ein flüssigeres und physiologischeres Gangbild. Diese Assoziationen werden am Meisten beim Gehen auf ebener Fläche deutlich. Die fehlende Korrelation zu den komplexeren Gangaufgaben könnte durch eine vorsichtigeren Herangehensweise der Patienten an die schwierigeren Aufgaben erklärt werden. Erhöhte Konzentration auf eine Gangaufgabe zeigte in vorherigen Studien eine größere Stabilität der Körperhaltung im Vergleich zu Gangaufgaben, die unter kognitiver Distraction durchgeführt wurden¹⁰. Patienten in dieser Studie zeigten bei der

5. Diskussion

Durchführung schwieriger Gangaufgaben Gangmuster, die mit verminderter Geschwindigkeit, reduzierten Werten für das Belastungsintegral und die Maximallast assoziiert sind. Dies deutet auf erhöhte Konzentration der Patienten bei diesen Gangaufgaben hin. Schlechtere klinische Outcomes bei allen anderen Gangaufgaben waren mit erhöhter Doppelstützzeit, Gangzykluszeit oder verminderter Kadenz assoziiert. Demzufolge scheinen Patienten mit einem schlechteren klinischen Outcome die Ganggeschwindigkeit während schwierigen Gangaufgaben zu reduzieren. Dies ist verständlich, da gezeigt wurde, dass langsamere Geschwindigkeiten im Gangzyklus die Stabilität der Körperhaltung beim Gehen erhöhen³⁰.

Die Veränderungen in der medio-lateralen Druckverteilung wurden bereits zuvor für Frakturen direkt unterhalb (Calcaneus)^{17,27}, sowie überhalb (Pilon Tibiale Frakturen)²⁶ des Talus, jedoch nicht für den Talus selbst, beobachtet. Der Effekt kann durch verminderte Eversionsbewegung des Rückfußes⁵⁴ erklärt werden, da Frakturen im Bereich des Subtalar-gelenks mit verminderter subtalarer Beweglichkeit assoziiert sind⁴⁵. Die Eversion ist Teil der subtalaren Bewegungsspanne und wird benötigt um dem Talus eine Rotation beim Übergang von Fersenkontakt zur Vollbelastung des Fußes zu ermöglichen. Eine eingeschränkte Eversion führt somit zu invertierten Fußpositionen, die eine Lateralisation des aufgebrachten Gewichts zur Folge hat. Die Restriktion der Eversion durch subtalare Verletzungen erklärt die signifikante Drucklateralisation bei Patienten mit Marti-Weber Typ III und IV Frakturen.

Alle diese Beobachtungen zeigen, dass Talusfrakturen bleibende Residuen zurück lassen. Diese können klinisch manifest sein und sich etwa durch Bewegungseinschränkungen der subtalaren Gelenke, Schmerzen oder ein augenscheinlich beeinträchtigt Gangbild äußern. Als Konsequenzen dieser Studie ergibt sich der Bedarf an einer auf den einzelnen Patienten angepassten Rehabilitation. Bereits Fox et al. beschreiben bei Patienten mit Sprunggelenksinstabilität eine auf beiden Extremitäten reduzierte Kraft¹⁴. Dies erklären sie mit einer verminderten kortikalen und subkortikalen Aktivität der betroffenen Motoneuronen nach langer Immobilisation. Folglich kommt der Frührehabilitation auch nach Talusfrakturen eine entscheidende Rolle zu. Da die Plantarflexoren bei Immobilisation zuerst atrophieren und sich als letztes wieder regenerieren^{24,25,32,59} fordern Hirschmüller et al ein besonderes Augenmerk auf sensomotorisches Training in der rehabilitativen Phase zu legen²⁴. Da der Ausgleich der neuromuskulären Defizite wichtiger ist, als der Ausgleich der Muskelatrophie, kann die Gangbildanalyse in der rehabilitativen Phase diese Defizite früh erkennen und den Therapiefortschritt überwachen. Weiterhin kann gangbildanalyse-gestütztes Gehtraining, wie etwa Feedback Training, Veränderungen im Gangbild früh erkennen und diesen entgegenwirken.

5. Diskussion

Hirschmüller et al. beschreiben eine Korrelation der von den Patienten selbst gewählten Ganggeschwindigkeit mit dem klinischen Outcome nach Kalkaneusfrakturen²⁴. Die Ganggeschwindigkeit kann mit Hilfe der Gangbildanalyse in der rehabilitativen Phase erfasst und somit der Verlauf der Rehabilitation beurteilt werden. Bei der Anpassung von orthopädischen Schuhen können ebenfalls wichtige Daten durch Gangbildanalyse erhoben und somit diese Schuhzurichtungen verbessert werden. Hirschmüller et al. fordern dabei ein besonderes Augenmerk auf den lateralen Fußrand zu legen²⁴. Da unsere Daten ebenfalls eine Lateralisation der Gangachse zeigen, ist diese Forderung auch bei Talusfrakturen berechtigt.

Schlussfolgerungen/Ausblick

Das vorgestellte Messprotokoll könnte demnach zwei Zielen während der Rehabilitation dienen: Die beschriebenen Gangbildveränderungen früh erkennen und den Therapiefortschritt überwachen.

Feedback Training mit der vorgestellten Version der „OpenGo Sohle“ (Moticon GmbH; München, Deutschland) ist bereits im Live-Modus, Simultan-Modus oder durch zeitverzögertes Feedback möglich. Trainingstechniken verbessern dabei sowohl Kurz-, als auch Langzeitergebnisse⁶⁶. Der Effekt von Ganganalyse basierendem Training wurde bereits in mehreren Studien nachgewiesen^{63,64}.

Das vorgestellte Messprotokoll könnte unmittelbar genutzt werden um weitere klinische und interventionelle Studien durchzuführen um den Effekt des vorgeschlagenen Trainings auf das klinische Outcome nach Talusfrakturen zu untersuchen.

6. Anhang

6.1 Abkürzungsverzeichnis

A.	Arterie
Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
Art.	Articulatio
AP	anterio-posterior
COP	Centre of Pressure (Druckmittelpunkt)
Et al.	Et alii/ et aliae
GLL	Ganglinienlänge
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
ML	medio-lateral
OMS	Olerud Molander Score
OSG	Oberes Sprunggelenk
Kp	Kilopond
ROM	Range of motion
Tab.	Tabelle
USG	Unteres Sprunggelenk
Vgl.	Vergleiche
Vs.	Versus

6.2 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabellen

- Tab. 1: Frakturklassifikation nach Marti und Weber
- Tab. 2: Frakturklassifikation nach Hawkins
- Tab. 3: Olerud-Molander Score
- Tab. 4: Auswertung des Olerud-Molander Scores
- Tab. 5: AOFAS Score
- Tab. 6: Röntgenmorphologische Klassifikation der posttraumatischen Arthrose nach Bargon
- Tab. 7: Demographische Ergebnisse

Abbildungen

- Abb. 1: Anatomie von Talus und Calcaneus (Ansicht von kranial)
(entnommen aus Prometheus)
- Abb. 2: Anatomie des Talus und Calcaneus (Ansicht von kaudal)
(entnommen aus Prometheus)
- Abb. 3: Blutversorgung des Talus von lateral (entnommen aus ⁴⁹)
- Abb. 4: Blutversorgung des Talus von medial (entnommen aus ⁴⁹)
- Abb. 5: Blutversorgung des Talus von plantar (entnommen aus ⁴⁹)
- Abb. 6: Intraossäre Blutversorgung des Talus (entnommen aus ¹⁶)
- Abb. 7: Klassifikation von Talusfrakturen nach Hawkins und Marti und Weber
(entnommen aus ⁵¹)
- Abb. 8.: Strecken des Gangparcours (a) Ebene, b) Treppenabstieg, c) Gefälle, d) Treppenaufstieg)
- Abb. 9: OpenGo Insole (Moticon GmbH; München, Deutschland)
- Abb. 10: Gangzyklus (entnommen aus ⁵⁷)
- Abb. 11: Gangkurve eines Schrittes des rechten Fußes eines Probanden mit Darstellung der Maximallast und des Belastungsintegrals

6. Anhang

- Abb. 12: Box plots der Werte für die verschiedenen Gangparameter für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität a) Belastungsintegral pro Schritt, b) Maximallast
- Abb. 13: Box plots der Werte für die verschiedenen Gangparameter für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität; a) antero-posteriore Druckmittelpunktsschwankung, b) medio-laterale Druckmittelpunktsschwankung
- Abb. 14: Box plots der Werte für die Standzeit für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität
- Abb. 15: Box plots der Werte für die Schwungzeit für jede Gangaufgabe der gesunden und verletzten Extremität
- Abb. 16: Spearman Korrelationsmatrix zwischen Gangparametern und Outcome
- Abb. 17: Korrelationen des AOFAS Scores (a) und des Olerud-Molander Scores (b) mit der antero-posterioren Ganglinien-Länge beim Gehen in der Ebene
- Abb. 18: Korrelation des Olerud-Molander Scores mit der Standzeit beim Treppenaufstieg
- Abb. 19: Korrelationen des AOFAS Scores (a) und des Olerud-Molander Scores (b) mit der Gangzyklusdauer beim Treppenabstieg
- Abb. 20: Korrelation des AOFAS Scores mit der medio-lateralen Ganglinien-Länge beim Laufen auf ansteigender Schräge
- Abb. 21: Korrelation des AOFAS Scores mit der Doppelstützzeit beim Laufen auf abfallender Schräge
- Abb. 22: Box plots der Werte für die medio-lateralen Druckdifferenzen für Vor- und Rückfuß a) im Vergleich von gesunder zu verletzter Extremität, b) im Vergleich von subtalar dislozierten zu subtalar nicht dislozierten Frakturen
- Abb. 23: Differenz der Ganglinienlateralisation von gesunder zu verletzter Extremität im Verhältnis zu a) Bargon Score, b) AOFAS Score, c) Olerud-Molander Score, d) Marti/Weber Klassifikation

7. Literaturverzeichnis

1. Adkin AL, Bloem BR, Allum JHJ. Trunk sway measurements during stance and gait tasks in Parkinson's disease. *Gait Posture*. 2005;22(3):240-249. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.09.009.
2. Ahmad J, Raikin SM. Current concepts review: talar fractures. *Foot Ankle Int*. 2006;27(6):475-482. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16764808>.
3. Alton T, Patton DJ, Gee AO. Classifications in Brief: The Hawkins Classification for Talus Fractures. *Clin Orthop Relat Res*. 2015:3046-3049. doi:10.1007/s11999-015-4136-x.
4. Baratto L, Morasso PG, Re C, Spada G. A new look at posturographic analysis in the clinical context: sway-density versus other parameterization techniques. *Motor Control*. 2002;6(3):246-270. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12122219>.
5. Bargon G, Henkemeyer H. [Long-term radiological and clinical observations following surgery for tibio-fibular syndesmosis after fractures of the upper ankle joint (author's transl)]. *Rofo*. 1977;126(6):542-545. doi:10.1055/s-0029-1230633.
6. Braun BJ, Bushuven E, Hell R, et al. A novel tool for continuous fracture aftercare—Clinical feasibility and first results of a new telemetric gait analysis insole. *Injury*. 2015.
7. Braun BJ, Veith NT, Hell R, et al. Validation and reliability testing of a new, fully integrated gait analysis insole. *J Foot Ankle Res*. 2015;8:54. doi:10.1186/s13047-015-0111-8.
8. Canale ST, Kelly Jr. FB. Fractures of the neck of the talus. Long-term evaluation of seventy-one cases. *J Bone Jt Surg Am*. 1978;64.
9. Canale ST, Kelly Jr. FB. Fractures of the neck of the talus. Long-term evaluation of seventy-one cases. *J Bone Jt Surg Am*. 1978;60(2):143-156. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/417084>.
10. Catena RD, van Donkelaar P, Chou LS. Cognitive task effects on gait stability following concussion. *Exp Brain Res*. 2007;176(1):23-31. doi:10.1007/s00221-006-0596-2.
11. Court-Brown CM, Caesar B. Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury*. 2006;37(8):691-697. doi:10.1016/j.injury.2006.04.130.

7. Literaturverzeichnis

12. Daniels TR, Smith JW, Ross TI. Varus malalignment of the talar neck. Its effect on the position of the foot and on subtalar motion. *J Bone Joint Surg Am.* 1996;78(10):1559-1567.
13. Fournier A, Barba N, Steiger V, et al. Total talar fracture - long-term results of internal fixation of talar fractures. A multicentric study of 114 cases. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012;98(4 Suppl):S48--55. doi:10.1016/j.otsr.2012.04.012.
14. Fox J, Docherty CL, Schrader J, Applegate T. Eccentric plantar-flexor torque deficits in participants with functional ankle instability. *J Athl Train.* 2008;43(1):51-54. doi:10.4085/1062-6050-43.1.51.
15. Frawley PA, Hart JA, Young DA. Treatment outcome of major fractures of the talus. *Foot Ankle Int.* 1995;16(6):339-345. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7550941>.
16. Gelberman R, WW M. The arterial anatomy of the talus. *Foot Ankle.* 1983;Sep-Oct(4(2)):64-72. doi:10.1177/107110078300400204.
17. Genc Y, Gultekin A, Duymus TM, Mutlu S, Mutlu H, Komur B. Pedobarography in the Assessment of Postoperative Calcaneal Fracture Pressure With Gait. *J Foot Ankle Surg.* 2016;55(1):99-105. doi:10.1053/j.jfas.2015.07.018.
18. Grob D, Simpson LA, Weber BG, Bray T. Operative treatment of displaced talus fractures. *Clin Orthop Relat Res.* 1985;(199):88-96. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4042501>.
19. Haggard P, Cockburn J, Cock J, Fordham C, Wade D. Interference between gait and cognitive tasks in a rehabilitating neurological population. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2000;69(4):479-486. doi:10.1136/jnnp.69.4.479.
20. Halvorson JJ, Winter SB, Teasdall RD, Scott AT. Talar neck fractures: a systematic review of the literature. *J Foot Ankle Surg.* 2013;52(1542-2224 (Electronic)):56-61. doi:10.1053/j.jfas.2012.10.008.
21. Hawkins LG. Fractures of the neck of the talus. *J Bone Jt Surg Am.* 1970;52(December).
22. Hawkins LG. Fractures of the neck of the talus. *J Bone Jt Surg Am.* 1970;52(5):991-1002. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5479485>.
23. Hesse S, Luecke D, Jahnke MT, Mauritz KH. Gait function in spastic hemiparetic patients walking barefoot, with firm shoes, and with ankle-foot orthosis. *Int J Rehabil Res.* 1996;19(2):133-141. doi:10.1097/00004356-199606000-00004.

7. Literaturverzeichnis

24. Hirschmüller A, Konstantinidis L, Baur H, et al. Do changes in dynamic plantar pressure distribution, strength capacity and postural control after intra-articular calcaneal fracture correlate with clinical and radiological outcome? *Injury*. 2011;42(10):1135-1143. doi:10.1016/j.injury.2010.09.040.
25. Hubbard TJ, Kramer LC, Denegar CR, Hertel J. Contributing factors to chronic ankle instability. *Foot Ankle Int*. 2007;28(3):343-354. doi:10.3113/FAI.2007.0343.
26. Jansen H, Fenwick A, Doht S, Frey S, Meffert R. Clinical outcome and changes in gait pattern after pilon fractures. *Int Orthop*. 2013;37(1):51-58. doi:10.1007/s00264-012-1716-1.
27. Jansen H, Frey SP, Ziegler C, Meffert RH, Doht S. Results of dynamic pedobarography following surgically treated intra-articular calcaneal fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2013;133(2):259-265. doi:10.1007/s00402-012-1655-8.
28. Kundel K, Braun W SA. *Spätergebnisse Nach Zentralen Talusverletzungen*. Vol 98. Springer; 1995. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3454424>. Accessed April 3, 2017.
29. Lindvall E, Haidukewych G, DiPasquale T, Herscovici Jr. D, Sanders R. Open reduction and stable fixation of isolated, displaced talar neck and body fractures. *J Bone Jt Surg Am*. 2004;86-A(10):2229-2234. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15466732>.
30. Luximon Y, Cong Y, Luximon A, Zhang M. Effects of heel base size, walking speed, and slope angle on center of pressure trajectory and plantar pressure when wearing high-heeled shoes. *Hum Mov Sci*. 2015;41:307-319. doi:10.1016/j.humov.2015.04.003.
31. Mayich DJ, Novak A, Vena D, Daniels TR, Brodsky JW. Gait analysis in orthopedic foot and ankle surgery--topical review, part 1: principles and uses of gait analysis. *Foot Ankle Int*. 2014;35(1):80-90. doi:10.1177/1071100713508394.
32. McKnight CM, Armstrong CW. The role of ankle strength in functional ankle instability. *J Sport Rehabil*. 1997;6(1):21. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=sph&AN=9705196180&site=ehost-live>.
33. Metzger MJ, Levin JS, Clancy JT. Talar neck fractures and rates of avascular necrosis. *J Foot Ankle Surg*. 1999;38(2):154-162. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10334706>.

7. Literaturverzeichnis

34. Mickle KJ, Munro BJ, Lord SR, Menz HB, Steele JR. Cross-sectional analysis of foot function, functional ability, and health-related quality of life in older people with disabling foot pain. *Arthritis Care Res.* 2011;63(11):1592-1598. doi:10.1002/acr.20578.
35. Mulfinger GL, Trueta J. The blood supply of the talus. *J Bone Joint Surg Br.* 1970;52(1):160-167. doi:10.1017/S0022215100054803.
36. Nair A V., Shamsuddin K, John PS, Hämäläinen JA, Kurien MA. Correlation of visual analogue scale foot and ankle (VAS-FA) to AOFAS score in malleolar fractures using Indian language questionnaire. *Foot Ankle Surg.* 2015;21(2):125-131. doi:10.1016/j.fas.2014.10.006.
37. Oerbekke MS, Stukstette MJ, Sch??tte K, de Bie RA, Pisters MF, Vanwanseele B. Concurrent validity and reliability of wireless instrumented insoles measuring postural balance and temporal gait parameters. *Gait Posture.* 2017;51:116-124. doi:10.1016/j.gaitpost.2016.10.005.
38. Olerud C, Molander H. A scoring scale for symptom evaluation after ankle fracture. *Arch Orthop Trauma Surg.* 1984;103(3):190-194. doi:10.1007/BF00435553.
39. Oppermann J, Franzen J, Spies C, et al. The microvascular anatomy of the talus: A plastination study on the influence of total ankle replacement. *Surg Radiol Anat.* 2014;36(5):487-494. doi:10.1007/s00276-013-1219-9.
40. Pajenda G, Vecsei V, Reddy B, Heinz T. Treatment of talar neck fractures: clinical results of 50 patients. *J Foot Ankle Surg.* 2000;39(6):365-375. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11131473>.
41. Pennal GF. Fractures of the talus. *Clin Orthop Relat Res.* 1963;30:53-63. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5889007>.
42. Perry J. Gait Analysis: Normal and Pathological Function. *SLACK Inc.* 1992:524. doi:10.1001.
43. Piriou P, Culpan P, Mullins M, Cardon JN, Pozzi D, Judet T. Ankle replacement versus arthrodesis: a comparative gait analysis study. *Foot Ankle Int.* 2008;29(1):3-9. doi:10.3113/FAI.2008.0003.
44. Potter JM, Evans a. L, Duncan G. Gait speed and activities of daily living function in geriatric patients. *Arch Phys Med Rehabil.* 1995;76(11):997-999. doi:10.1016/S0003-9993(95)81036-6.

7. Literaturverzeichnis

45. Pozo JL, Kirwan EO, Jackson AM. The long-term results of conservative management of severely displaced fractures of the calcaneus. *J Bone Joint Surg Br.* 1984;66(3):386-390. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6725350>.
46. Pretterklieber ML. Anatomie und kinematik der sprunggelenke des menschen. *Radiologe.* 1999;39(1):1-7. doi:10.1007/s001170050469.
47. Rammelt S, Biewener A, Grass R, Zwipp H. Verletzungen des fu??es beim polytraumatisierten patienten. *Unfallchirurg.* 2005;108(10):858-865. doi:10.1007/s00113-005-0993-1.
48. Rammelt S, Winkler J, Grass R, Zwipp H. Reconstruction after talar fractures. *Foot Ankle Clin.* 2006;11(1):61-84. doi:10.1016/j.fcl.2005.11.002.
49. Rammelt S, Zwipp H. Talar neck and body fractures. *Injury.* 2009;40(2):120-135. doi:10.1016/j.injury.2008.01.021.
50. Richter M, Frink M, Zech S, et al. Intraoperative pedography: a validated method for static intraoperative biomechanical assessment. *Foot ankle Int / Am Orthop Foot Ankle Soc [and] Swiss Foot Ankle Soc.* 2006;27(10):833-842.
51. Richter M, Zech S. Behandlung der Talusfraktur. 2007:1-6.
52. Richter M, Zech S, Leonard J, Goldner Award 2009. Intraoperative pedobarography leads to improved outcome scores: a Level I study. *Foot ankle Int / Am Orthop Foot Ankle Soc [and] Swiss Foot Ankle Soc.* 2009;30(11):1029-1036. doi:10.3113/FAI.2009.1029.
53. Robain G, Valentini F, Renard-Deniel S, Chenneville J-M, Piera J-B. Un paramètre baropodométrie pour l'analyse de la marche du patient hémiplégique : le trajet du centre de pression. *Ann Réadaptation Médecine Phys.* 2006;49(8):609-613. doi:10.1016/j.annrmp.2006.05.002.
54. Rosenbaum D, Lubke B, Bauer G, Claes L. Long-term effects of hindfoot fractures evaluated by means of plantar pressure analyses. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1995;10(7):345-351. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11415578>.
55. Sanders DW, Busam M, Hattwick E, Edwards JR, McAndrew MP, Johnson KD. Functional outcomes following displaced talar neck fractures. *J Orthop Trauma.* 2004;18(5):265-270. doi:10.1097/00005131-200405000-00001.
56. Schuind F, Andrienne Y BF. Fractures et luxations de l'astragale Revue de 359 cas. *Acta Orthop Belg.* 1983:652-689.

7. Literaturverzeichnis

57. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. *PROMETHEUS Lernatlas Der Anatomie. Allgemeine Anatomie Und Bewegungssystem.*; 2005.
doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
58. Spaulding SJ. Basic Biomechanics. *Ergon Ther.* 2008;1:94-102. doi:10.1016/B978-032304853-8.50009-3.
59. Stevens JE, Walter GA, Okereke E, et al. Muscle adaptations with immobilization and rehabilitation after ankle fracture. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(10):1695-1701.
doi:10.1249/01.MSS.0000142407.25188.05.
60. Stöggel T, Martinier A. Validation of Moticon's OpenGo sensor insoles during gait, jumps, balance and cross-country skiing specific imitation movements. *J Sports Sci.* 2016.
61. Vallier H a, Nork SE, Barei DP, Benirschke SK, Sangeorzan BJ. Talar neck fractures: results and outcomes. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86-A:1616-1624.
62. Vallier HA, Nork SE, Benirschke SK, Sangeorzan BJ. Surgical treatment of talar body fractures. *J Bone Jt Surg Am.* 2003;85-A(9):1716-1724. doi:10.1016/j.fas.2009.02.004.
63. Wall C, Wrisley DM, Statler KD. Vibrotactile tilt feedback improves dynamic gait index: A fall risk indicator in older adults. *Gait Posture.* 2009;30(1):16-21.
doi:10.1016/j.gaitpost.2009.02.019.
64. Wheeler JW, Shull PB, Besier TF. Real-time knee adduction moment feedback for gait retraining through visual and tactile displays. *J Biomech Eng.* 2011;133(4):41007.
doi:10.1115/1.4003621.
65. Wildenauer E. Die Blutversorgung des Talus. *Z Anat Entwicklungsgesch.* 1950;36.
<http://link.springer.com/article/10.1007/BF00522646>.
66. Winstein CJ, Pohl PS, Cardinale C, Green A, Scholtz L, Waters CS. Learning a partial-weight-bearing skill: effectiveness of two forms of feedback. *Phys Ther.* 1996;76(9):985-993.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8790276>
<http://ptjournal.apta.org/content/ptjournal/76/9/985.full.pdf>.

Eidesstattliche Versicherung

Ich, Patrick Pelz, versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation zu dem Thema „Langzeitveränderungen nach Talusfrakturen - dynamisch pedobarographische Untersuchung mit einem voll integrierten Ganganalysesystem“ selbstständig und ohne die nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine außer der angegebenen Quellen benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik und Resultaten entsprechen den URM (Uniform Requirements for Manuscripts) und werden von mir verantwortet.

Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen (§156 und §161 des Strafgesetzbuches) einer unwahrheitsgemäßen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt und bewusst.

Danksagung

Ich danke allen Beteiligten an dieser Arbeit. An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer Benedikt Braun für seine exzellente und umfassende Betreuung danken. Er stand mir immer mit Rat und Tat zur Seite und nahm sich immer Zeit für meine Anliegen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Tim Pohlemann für die Möglichkeit diese Arbeit an der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes durchführen zu können.

Außerdem danke ich allen Mitarbeitern der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums des Saarlandes insbesondere Nils Veith, Marcel Orth, Steven Herath, Moritz Klein und Jörg Holstein.

Des weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. med. Thomas Tschernig für die Mitarbeit an der Publikation der hier erhobenen Daten.

Zuletzt gilt mein tiefster Dank meinen Eltern für die Unterstützung in guten sowie in schlechten Zeiten. Ohne sie wäre ich heute nicht dort, wo ich bin und nicht derjenige, der ich heute bin.

Publikation und Kongressbeiträge

Braun B, Veith N, Pelz P, Klein M, Holstein J, Pohlemann T. (2016)

Langzeitgangveränderungen nach Talusfrakturen. WI45 Fuß und Sprunggelenk, Vortrag WI45-845 beim Deutschen Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie 2016 in Berlin

Braun BJ, Pelz P, Veith NT, Rollmann M, Klein M, Herath SC, Holstein JH, Pohlemann T. Long-term pathological gait pattern changes after talus fractures — dynamic measurements with a new insole. *Int Orthop*. 2018.