

Der Orthopäde

Band 20 · 1991

Herausgeber

R. Bauer, Innsbruck

N. Gschwend, Zürich

D. Hohmann, Erlangen

E. Morscher, Basel

L. Schweiberer, München

H. Tscherne, Hannover

H. Wagner, Schwarzenbruck



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest

Bandinhaltsverzeichnis Band 20 1991

Heft 1: Der traumatisierte Fuß

Redigiert von L. Schweiberer

L. Schweiberer: Einführung zum Thema	1
R. Putz, M. Müller-Gerbl: Funktionelle Anatomie des Fußes	2
U. H. Brunner, U. Blahs, R. W. Kenn: Der traumatisierte Fuß – klinische und radiologische Untersuchung	11
Th. Mittlmeier, M. M. Morlock: Statische und dynamische Belastungsmessungen am posttraumatischen Fuß	22
E. Beck: Die Talusfraktur	33
K. Stockenhuber, W. Seggl, G. Feichtinger, R. Szyszkowitz: Die konservative und semikonservative Behandlung der Kalkaneusfraktur	43
U. H. Brunner, A. Betz, R. Halama: Die operative Behandlung der Kalkaneusfraktur	55
R. Brutscher: Frakturen und Luxationen des Mittel- und Vorfußes	67
V. Echtermeyer: Das Kompartiment-Syndrom des Fußes	76
W. Stock, J. Hankiss: Posttraumatische Weichteildefekte am Fuß	80
A. Cracchiolo: Arthrodesetechnik bei posttraumatischen Fußleiden	86
S. T. Hansen: Posttraumatische Fehlstellung des Rückfußes	95
C. D. Morgan: Arthroskopische Arthrodesese des oberen Sprunggelenks	99

Heft 2: Die obere Halswirbelsäule

Redigiert von D. Grob und J. Dvořák

D. Grob, J. Dvořák: Einführung zum Thema	105
M. M. Panjabi: Dreidimensionale Testung der Stabilität von Wirbelsäulenimplantaten	106
M. M. Panjabi, J. Dvořák, J. Crisco, T. Oda, D. Grob: Instabilität bei Verletzung der Lig. alaria. Ein biomechanisches Modell	112
J. Dvořák: Funktionelle Röntgendiagnostik der oberen Halswirbelsäule	121
H. Baumgartner: Symptomatologie, klinische Diagnostik und Therapie der funktionellen Störung	127
D. Grob, P. Sacher, H. J. G. Scheier, L. Kaufmann, J. Dvořák: Orthopädische Probleme an der oberen Halswirbelsäule bei Kindern und Jugendlichen	133
H. A. Crockard: Ventrale Zugänge zur oberen Halswirbelsäule	140

M. Aebi, Ch. Etter: Die ventrale direkte Verschraubung bei Densfrakturen	147
--	-----

D. Grob, J. Dvořák, M. M. Panjabi, J. Hayek: Die dorsale atlantoaxiale Verschraubung. Ein Stabilitätstest in vitro und in vivo	154
--	-----

Heft 3: Die Knie totalendoprothese

Redigiert von R. Bauer

R. Bauer: Einführung zum Thema	163
W. Plitz: Endoprothetik am Kniegelenk	164
E. Nieder: Schlittenprothese, Rotationsknie und Scharnierprothese Modell St. Georg und ENDO-Modell	170
M. Krismer, B. Stöckl, T. Achammer, T. Penz, F. Weber: Mittelfristige Ergebnisse mit der Kinematikkniprothese	181
H. Kienapfel, P. Griss, J. Orth, K. Roloff, U. Malzer: Zwei- bis Fünfjahresergebnisse mit der zementfrei einsetzbaren Kniegelenkprothese vom Typ Miller-Galante	189
N. Gschwend, H. Siegrist: Das GSB-Kniegelenk	197
W. Blauth, J. Hassenpflug: Scharnierendoprothesen des Kniegelenks	206
W. Küsswetter, S. Sell: Die kontinuierliche passive Mobilisation in der Nachbehandlung von Kniegelenkendoprothesen	216
R. Herzog, E. Morscher: Fehlschläge in der Kniegelenkprothetik	221
A. Härle: Die Infektion bei Knieendoprothesen	227
T. K. Drobny, U. Munzinger: Zur Problematik der infizierten Knieprothese	239
G. von Foerster, D. Klüber, U. Käbler: Mittel- bis langfristige Ergebnisse nach Behandlung von 118 periprotetischen Infektionen nach Kniegelenkersatz durch einzeitige Austauschoperation	244

Heft 4: Neuere Erkenntnisse in der Schulterchirurgie I

Redigiert von N. Gschwend

N. Gschwend: Einführung zum Thema	253
N. Gschwend, H. R. Bloch, A. Bischof: Langzeitergebnisse der operierten Rotatorenmanschettenruptur	255
W. Blauth, J. Gärtner: Ergebnisse postoperativer Arthrographien nach Naht rupturierter Rotatorenmanschetten	262

F. Gohlke, J. Eulert: Operative Behandlung der vorderen Schulterinstabilität	266
H. Resch: Neuere Aspekte in der arthroskopischen Behandlung der Schulterinstabilität	273
T. Jaeger, J. Hassenpflug: CPM-Behandlung des Schultergelenks	282

Heft 5: Neuere Erkenntnisse in der Schulterchirurgie II

Redigiert von N. Geschwend

N. Gschwend: Einführung zum Thema	287
C. R. Constant: Schulterfunktionsbeurteilung	289
D. Goutallier, J. Bernageau: Die Untersuchung der nicht traumatischen Schulter	295
L. U. Bigliani, J. B. Ticker, E. L. Flatow, L. J. Soslowky, V. C. Mow: Die Beziehung von Akromialarchitektur zu Erkrankungen der Rotatorenmanschette	302
J. P. Liotard, P. Cochard, G. Walch: Zwei Röntgenzielaufnahmen für den Subakromialraum vor und nach Akromioplastik. Ergebnisse einer Untersuchungsserie von 40 Patienten	310
B. Augereau: Rekonstruktion massiver Rotatorenmanschettenrupturen mit einem Deltoidlappen	315
C. S. Neer II: Die Schulterarthroplastik heute	320

Heft 6: Die fehlverheilte kindliche Fraktur

Redigiert von H. Tscherne

H. Tscherne: Einführung zum Thema	323
F. Hefti, L. von Laer, E. Morscher: Prinzipien der Pathogenese posttraumatischer Achsenfehler im Wachstumsalter	324
L. von Laer, R. Brunner, Chr. Lampert: Fehlverheilte suprakondyläre und kondyläre Humerusfrakturen	331
P. Hertel, M. Bernard, Y. Moazami-Goudarzi: Die fehlverheilte kindliche Fraktur – der Monteggia-Schaden	341
R. Ganz, C. Gerber: Fehlverheilte kindliche Frakturen im Becken- und Hüftbereich	346
R. Marti, P. P. Besselaar: Fehlverheilte kindliche Ober- und Unterschenkelchaftbrüche. Spontankorrektur, Komplikationen, Indikation zu Korrekturingriffen	353
D. Gast, F. U. Niethard, H. Cotta: Fehlverheilte kindliche Frakturen im Kniegelenkbereich	360
R. Marti, P. P. Besselaar, E. Raaymakers: Fehlstellungen nach Verletzungen der distalen Tibia und Fibulaepiphysen	367
H. Zwipp, Th. Ranft: Fehlverheilte kindliche Frakturen im Fußbereich	374
<i>Sachregister</i>	380

Inhalt Band 20

Funktionelle Anatomie des Fußes

R. Putz und Magdalena Müller-Gerbl

Anatomische Anstalt der Ludwig-Maximilians-Universität München

Functional anatomy of the foot

Summary. The foot is presented in all its complexity as an entity that is the result of evolution as a morphological compromise between the static and dynamic demands made upon it. The subchondral mineralization of the ankle joints and the morphology of the ligaments is described in detail. A point of particular interest is the plantar aponeurosis and the septa plantaria. Additionally, the kinematic and dynamic aspects are discussed with respect to their relationship to the whole foot. Finally, an overview of the most important vessels and topographical regions is given.

Key words: Foot – Ankle joints – Plantar aponeurosis – Biomechanics – Topography.

Zusammenfassung. Der Fuß wird in seiner Komplexität als Ganzheit dargestellt, wie er sich in der Evolution als morphologischer Kompromiß sowohl statischer als auch dynamischer Anforderungen entwickelt hat. Detailliert wird die subchondrale Mineralisierung der Sprunggelenke sowie ihr Bandapparat dargestellt. Besonders wird auf die Plantaraponeurose und die von ihr ausgehenden Septa plantaria eingegangen. Auch Kinematik und Dynamik werden in bezug auf die Ganzheit des Fußes dargestellt. Daran schließt sich eine Übersicht über die wichtigsten Leitungsbahnen und topographischen Regionen an.

Schlüsselwörter: Fuß – Sprunggelenke – Plantaraponeurose – Biomechanik – Topographie.

Die komplexe Morphologie des Fußes spiegelt seine ebenso komplexe Funktion beim Stehen wie bei der Fortbewegung wider. Der Fuß erscheint als „Organ“, das unter dynamischen Gesichtspunkten gerade in Momenten größter Krafteinwirkung durch den Bodenkontakt in seiner dreidimensionalen Beweglichkeit eingeschränkt ist. In seiner im Gangzyklus wechselnden Fixierung auf der Unterlage ist er häufig direkter und ungünstiger Krafteinwirkung ausgesetzt, während sich die übrigen Körperteile frei nach dem Spiel der Kräfte einstellen können.

Als Ganzheit betrachtet, ist der Fuß als eine in sich verdrehte Bogenkonstruktion anzusehen [13, 22, 34, 35], deren eher filigrane, in erster Linie auf Druck beanspruchten Anteile durch eine Reihe von aktiven und passiven zugfesten Einrichtungen verspannt werden. Der gesamte Fuß nimmt teil am Aufbau des Längsgewölbes, während das Quergewölbe nur den Vorfuß betrifft. Dem Gewölbmodell entspricht auch die innere Struktur sowohl der schlanken röhrenförmigen Mittelfuß- als auch der unregelmäßig würfelförmigen Fußwurzelknochen (Abb. 1). Während die Knochen des Vorfußes eine vorzugsweise axial ausgerichtete Spongiosa bzw. Kortikalis besitzen, weisen die Knochen des Rückfußes, Talus und Kalkaneus, spitzbogenartige Spongiosastrukturen auf, die als Anpassung an überlagerte Biegebeanspruchung zu interpretieren sind [19, 33]. Daß die Spongiosa der Fußknochen trajektorieell angeordnet ist, wird durch die identische Anordnung der Apatitkristalle des Knochengewebes unterstrichen [1].

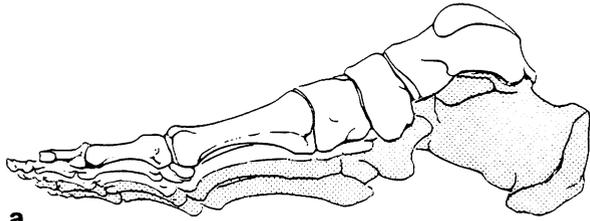
Über die mechanischen Erfordernisse einer Gewölbe-konstruktion hinaus sind in der Fußsohle osteofibröse Röhren ausgebildet, die einerseits als druckverteilende Polster anzusehen sind und andererseits den Leitungsbahnen der Fußsohle Schutz bieten. Schließlich ist noch auf das dicke subkutane Fettpolster der Fußsohle und der Fersenregion hinzuweisen, dem vor allem für die Stoßübertragung eine wichtige Rolle zukommt.

Morphologie des Fußes

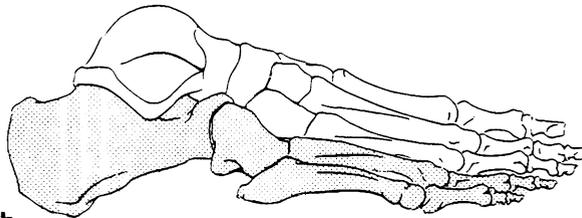
Sprunggelenke

Trotz ihrer getrennten Gelenkspalte stellen die beiden Sprunggelenke eine funktionelle Einheit dar, obwohl sie durch die übergreifenden Anteile der Kollateralbänder nur z. T. zu einer morphologischen Einheit zusammengefaßt werden (Abb. 1, 2).

Oberes Sprunggelenk. Der proximale Gelenkkörper des oberen Sprunggelenks (Talokruralgelenk – OSG) wird von den beiden Facies articulares der Malleoli und der Fa-



a



b

Abb. 1 a, b. Fußskelett. Die 3 medialen Strahlen (I, II, III – weiß) sind am Talus, die beiden lateralen (IV, V – grau) am Kalkaneus abgestützt. **a** Ansicht von plantar/medial. **b** Ansicht von dorsal/lateral

cies articularis inferior, also von Tibia und Fibula, aufgebaut und umgreift – fest verbunden durch die tibiofibularen Bänder und die Syndesmosis tibiofibularis – die Trochlea tali mit den medial und lateral abfallenden Facies malleolares. Für die federnde Festigkeit, die die Malleolengabel auszeichnet, scheint die Membrana interossea von besonderer Bedeutung zu sein [11]. Die angedeutete Keilform der Trochlea tali und die Ausformung des fibularen Gelenkanteils führen dazu, daß das Talokrualgelenk in Plantarflexionsstellung etwas mehr Spiel be-

sitzt als in extremer Dorsalflexionsstellung. Die Trochlea tali weist eine flache, sagittal ausgerichtete Rinne auf, der ein in gleicher Weise ausgerichteter First der Facies articularis inferior der Tibia entspricht (Abb. 2). Nach Riede [28] kann diese Rinnenbildung des Talus mit Hilfe des „Talusprofilquotienten“ quantifiziert werden, der vom jugendlichen (Quotient: 0,1) zum älteren Menschen (Quotient: 0,01) abnimmt, was eine relative Abflachung der Rolle ausdrückt.

Die Darstellung der Verteilung der subchondralen Knochendichte (Abb. 3a, b) erlaubt eine Aussage über die individuelle Anpassung an eine bestimmt, länger bestehende Spannungsverteilung. Entsprechend unterschiedlichen Talusprofilquotienten konnten bislang 3 Haupttypen gefunden werden, die als normal anzusehen sind. Die höchsten Dichtestufen finden sich meist entlang der medialen Kante der Trochlea und im Zentrum der lateralen Seitenfläche. Die Malleolengabel weist eine korrespondierende Dichteverteilung auf [23].

Die Verteilung der Knorpeldicke entspricht in etwa der der subchondralen Mineralisierung. Die höchsten Werte – bis zu 3 mm – treten entlang der medialen Kante der Trochlea auf, ein weiteres Maximum findet sich im Zentrum der lateralen Seitenfläche. Eine Untersuchung der Spaltlinien [14] weist darauf hin, daß sich beim alten Menschen die Zone der größten Beanspruchung in den hinteren Bereich der Talusrolle, also von den Kanten nach innen, verschiebt.

Unteres Sprunggelenk. Am Aufbau des unteren Sprunggelenks (Subtalar- und Talonavikulargelenk – USG) nehmen sowohl Talus und Kalkaneus als auch Os naviculare teil. Durch den Sinus und seinen Inhalt werden 2 Gelenkhöhlen getrennt. Die Facies articulares



a



b

Abb. 2 a, b. Schnittanatomie. **a** Sagittalschnitt in Höhe der medialen Kante des Talus. **b** Frontalschnitt in Höhe des Scheitels der Talusrolle. 1 = Art. tibiotalaris (OSG); 2 = mit Synovialmembran ausgekleideter Spalt zwischen Tibia und Fibula; 3 = Art. subtalaris;

4 = Art. talonavicularis; 5 = Aponeuosis plantaris; 6 = M. flexor digitorum brevis; 7 = M. quadratus plantae. Beachte das Lig. talocalcaneare interossum, das den Sinus tarsi vollständig erfüllt

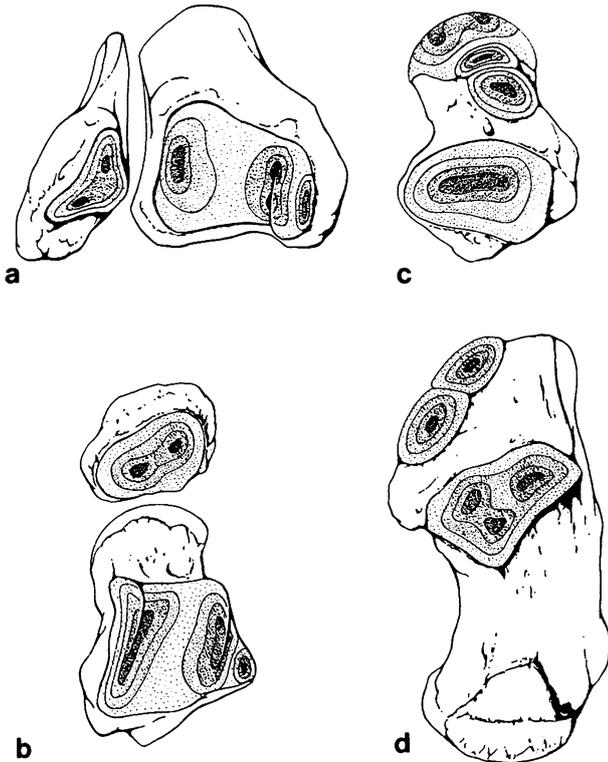


Abb.3a-d. Flächenhafte Verteilung der subchondralen Mineralisierung [23]. **a, b** OSG. Die höchste Mineralisierung findet sich im vorderen lateralen Bereich der Facies articularis inferior und am Übergang zum Malleolus, sowie im Zentrum der medialen malleolaren Gelenkfläche. In der lateralen malleolaren Gelenkfläche liegt ein Maximum weit distal. Grundsätzlich lassen sich in Abhängigkeit vom Alter 3 Mineralisierungstypen unterscheiden. Hier ist der einer jüngeren Altersstufe entsprechende Haupttyp dargestellt, bei dem sich hohe Mineralisierungsstufen an den Kanten in der Trochlea tali sowie in der dem Malleolus lateralis zugewandten Seitenwanne finden. **c, d** USG. Hohe Mineralisierungsstufen finden sich jeweils entlang der lateralen Kanten der einander zugewandten Gelenkflächen des Talokalkaneargelenks. Die Gelenkflächen des Talonavikulargelenks weisen je 2 exzentrisch gelegene Dichtemaxima auf

calcaneares tali posterior und media bauen gemeinsam mit den korrespondierenden Flächen des Kalkaneus den hinteren Anteil auf, der als *Articulatio subtalaris* bezeichnet wird. Der vordere Anteil, die *Articulatio calcaneonavicularis*, wird vom *Caput tali*, der korrespondierenden *Fossa navicularis* sowie den beiden einander zugewandten vorderen Gelenkflächen von Talus und Kalkaneus gebildet.

Auch das untere Sprunggelenk weist eine charakteristische Verteilung der subchondralen Knochendichte auf (Abb.3c, d). In den einander zugewandten Gelenkflächen von Kalkaneus und Talus liegen die Dichtemaxima beim älteren Menschen jeweils zentral, in der hinteren Gelenkfläche etwas nach lateral ausgedehnt. Auch in den beiden Gelenkflächen des Talonavikulargelenks korrespondieren die Verteilungsmuster der subchondralen Mineralisierung weitgehend (Abb.3b, c). Zumeist finden sich 2 nebeneinanderliegende Dichtemaxima, von denen aus die Dichte konzentrisch zu den Rändern abfällt. Ihre Lage ist als Ausdruck einer funktionellen Inkongruenz anzusehen [24].

Bandapparat der Sprunggelenke. Der Bandapparat der medialen Seite der beiden Sprunggelenke ist streng genommen in 2 Schichten aufgebaut. Relativ oberflächlich liegt das *Retinaculum musculorum flexorum*, das von der Außenkante des Malleolus medialis zum medialen Rand des *Tuber calcanei* zieht (Abb.4a). Das funktionell bedeutendere Band ist das tiefer gelegene, feste *Lig. deltoideum*, das proximal die Spitze und die angrenzenden Kanten des Malleolus medialis als Ursprung benützt und in 4 Anteilen nach distal divergiert. Die *Pars tibiotalaris anterior* strahlt nach kurzem Verlauf in den medialen oberen Umfang des *Collum tali* ein und wird von der *Pars tibionavicularis* überdeckt, die ihrerseits bis zum medialen Randwulst des *Os naviculare* zieht. Sie wird von der an der Oberkante des *Sustentaculum talare* ansetzenden *Pars tibiocalcanea* überlagert. Am tiefsten liegt die dorsal gelegene *Pars tibiotalaris posterior*, die von der *Pars tibiocalcanea* durch eine von Blutgefäßen und Bindegewebe erfüllte, breite Lücke getrennt ist und bis zum *Tuberculum mediale* des *Processus posterior tali* zieht. Sie weist unter den medialen Bändern die größte Tragkraft bzw. Reißfestigkeit auf [31].

Funktionell betrachtet erfüllen die medialen Bänder der Sprunggelenke 2 Aufgaben (Abb.5a, b). Die *Pars tibiotalaris anterior* wird in der Endstellung der Plantarflexion im oberen Sprunggelenk, die *Pars tibiotalaris posterior* in der Endstellung der Dorsalflexion gespannt. Da der Ansatz des *Lig. deltoideum* den gesamten distalen Rand des Malleolus medialis umgreift, kommt es besonders beim Ablauf der Plantarflexion zu einer Verdrehung seiner vorderen Bandanteile. Dies stellt einen Bremsmechanismus dar, der einen zusteilen Spannungsanstieg in der Endphase der Bewegung vermeiden hilft. Eine weitere Aufgabe des medialen Bandapparates liegt in der Begrenzung der Abknickung nach lateral (*Valgusbeanspruchung* [10]). Damit wird einerseits das Aufklappen des oberen Sprunggelenks verhindert, andererseits wird damit auch die *Pronationsbewegung* des unteren Sprunggelenks begrenzt.

Während die oberflächlichen und die tiefen Anteile des medialen Bandapparates feste Platten bilden, ist der fibuläre Bandapparat in 3 relativ dünne, getrennte Anteile gegliedert (Abb.4b). Vom Vorderrand der Spitze des Malleolus lateralis entspringt das *Lig. talofibulare anterius* und zieht in 2 parallelen Zügen [8, 30] leicht abfallend zum proximalen Umfang des *Collum tali*. Das *Lig. calcaneofibulare* entspringt eng umschrieben knapp medial und ventral der von Bandansätzen freibleibenden Spitze des Malleolus lateralis und setzt an der Außenfläche des Kalkaneus knapp hinter der *Trochlea peronealis* an. Das *Lig. talofibulare posterius* schließlich entspringt entlang des Hinterrandes der Gelenkfläche des Malleolus lateralis und verläuft quer nach medial zum *Tuberculum laterale* des *Processus posterior tali* (Abb.4c). Es ist nicht so homogen aufgebaut wie die beiden anderen Bänder, sondern besteht variabel aus mehreren Anteilen, die zwischen sich Gefäße und Bindegewebe führen [8]. Auf die große Variabilität der lateralen Bänder weisen Ludolph et al. [19] hin.

Die vorderen und die hinteren fibulären Bänder haben eine mit den entsprechenden medialen Bändern vergleichbare Funktion in der Begrenzung von Dorsalflexion bzw. Plantarflexion (Abb.5c, d). Beim Bewegungsablauf der *Sagittalflexion* bestimmen sie die zwangsläufige Rotation

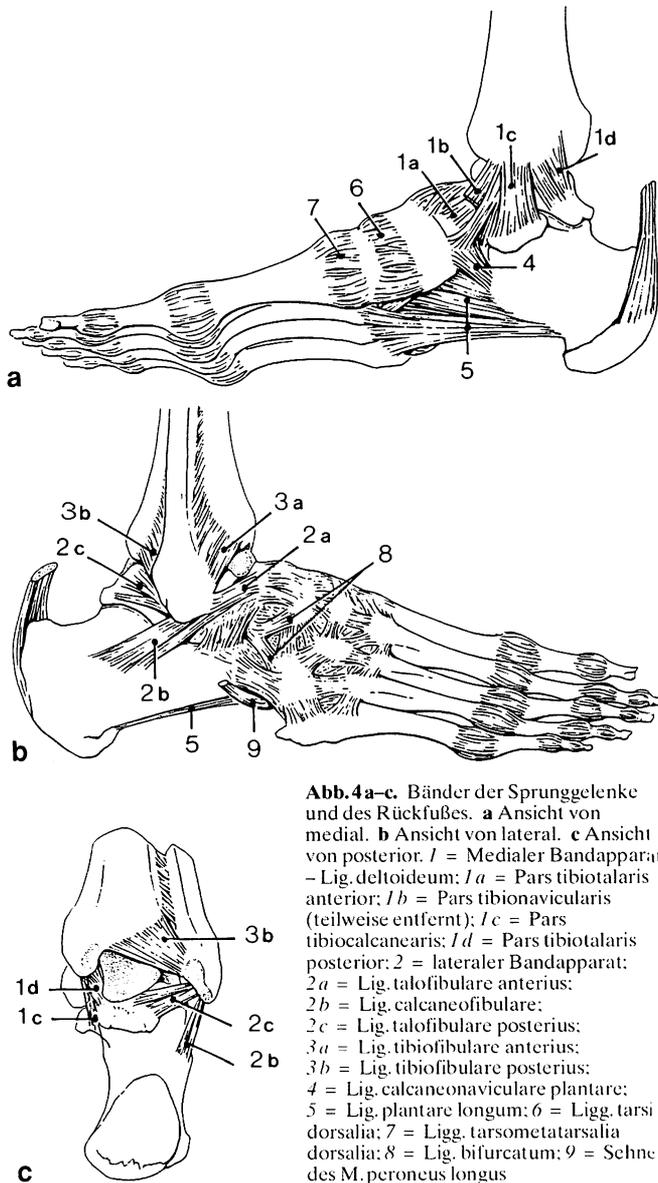


Abb. 4a-c. Bänder der Sprunggelenke und des Rückfußes. **a** Ansicht von medial. **b** Ansicht von lateral. **c** Ansicht von posterior. 1 = Medialer Bandapparat - Lig. deltoideum; 1a = Pars tibiotalaris anterior; 1b = Pars tibionavicularis (teilweise entfernt); 1c = Pars talocalcanearis; 1d = Pars tibiotalaris posterior; 2 = lateraler Bandapparat; 2a = Lig. talofibulare anterior; 2b = Lig. calcaneofibulare; 2c = Lig. talofibulare posterius; 3a = Lig. tibiofibulare anterius; 3b = Lig. tibiofibulare posterius; 4 = Lig. calcaneonaviculare plantare; 5 = Lig. plantare longum; 6 = Ligg. tarsi dorsalia; 7 = Ligg. tarsometatarsalia dorsalia; 8 = Lig. bifurcatum; 9 = Sehne des M. peroneus longus

der Fibula in Abhängigkeit von der Art der schraubigen Verdrehung der lateralen Gelenkfläche des Talus [27].

Die im Vergleich mit der kontralateralen Seite wesentlich geringere Ausbildung der lateralen Bänder ist unter kausalhistogenetischen Gesichtspunkten zu verstehen, da mit Ausnahme der Endphasen der Dorsal- und Plantarflexion kaum eine Varusbeanspruchung stattfindet. Der Befund von Wirth et al. [37], daß alle lateralen Bandanteile in 0-Stellung entspannt sind, ist also durchaus nachvollziehbar. Abknicken nach lateral führt zwar leicht zu Band- oder Knochenrissen, andererseits erübrigt sich häufig eine operative Therapie.

Im Gegensatz zu den festen Kollateralbändern sind vordere und hintere Kapselwand sehr dünn und so schlaff ausgebildet, daß sie nur in den entsprechenden Extremlagen gespannt werden. Dadurch besteht sowohl von vorne (anteriorer und anteromedialer Zugang) als auch von hinten (dorsolateraler Zugang) die Möglichkeit, einen Teil der Gelenkoberflächen zu übersehen [26]. Auch die synovialen Falten, die sich entlang der tibialen Vorder- und der Hinterkanten vorstülpen, können von diesen zu-

gängen aus dargestellt werden. Weniger gut ist der Einblick in den sagittalen Spaltraum zwischen Tibia und Fibula (Abb. 2b), der häufig ebenfalls von synovialen Gewebe erfüllt ist [23, 34].

Das zentral im USG gelegene Lig. talocalcaneare interosseum verbindet die einander gegenüberliegenden Knochenfurchen von Talus und Kalkaneus, die gemeinsam den sich nach lateral und ventral trichterförmig öffnenden Sinus tarsi formen (Abb. 1, 2 und 4). Der komplexe schraubige Aufbau des Bandes spiegelt die komplizierte Kinematik des Gelenks wider und erinnert in seiner Verdrehung an die Kreuzbänder des Kniegelenks (Abb. 2a). Der mediale Bandanteil liegt in der Tiefe des Sinus und überbrückt ihn in 2 flächenhaft getrennten, annähernd frontal eingestellten Platten. Der laterale besteht aus 2 etwas dickeren Bündeln, die gegeneinander leicht verschraubt den Öffnungsbereich des Sinus erfüllen und an der lateralen Fläche des Collum tali fixiert sind. Dazu kommen in variabler Ausbildung 2 oberflächliche Bandzüge, das Lig. talocalcaneum laterale und das Lig. talocalcaneum anterius [35], die als maßgebliche Begrenzungsbänder der Supination anzusehen sind. Vom Tuberculum mediale des Processus posterior tali aus zieht das Lig. talocalcaneum mediale zum Sustentaculum tali und strahlt dort in das Lig. deltoideum ein.

Als Ganzheit scheint der interossäre Bandapparat einer Ventralverschiebung und Innenrotation des Kalkaneus bei Varusstreß entgegenzuwirken [38]. Die relativ große Variabilität der fibularen und der interossären Bänder darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß im einzelnen eine exakte Form-Funktions-Wechselbeziehung besteht [37].

Vom plantar her wird der Bandapparat des USG durch das Lig. calcaneonaviculare plantare direkt ergänzt (Abb. 6a). Es stellt gemeinsam mit dem Lig. calcaneocuboideum plantare eine Abspaltung des Lig. plantare longum dar. Vom Sustentaculum tali zieht es zum plantaren Umfang des Os naviculare, ist an seiner dem Caput tali zugewandten Fläche mit Faserknorpel, der Fibrocartilago navicularis, durchsetzt, weist allerdings eine mit Fett erfüllte Lücke auf [36].

Fußwurzel- und Mittelfußgelenke. Zwei Gruppen von Bändern verbinden die vorderen Knochen der Fußwurzel einerseits untereinander bzw. mit den Basen der Mittelfußknochen (Abb. 4a, b). Sowohl auf der Dorsal- als auch auf der Plantarseite bestehen kurze Verbindungen der einander jeweils anliegenden Knochen. Im Bereich des sog. Chopart-Gelenks kommt dem Lig. bifurcatum, das, ausgehend vom vordersten Bereich der Oberkante des Kalkaneus, zum Oscuboideum und zum Osnaviculare ausstrahlt, die wichtigste Bedeutung zu. Seine Hauptfunktion scheint in der Begrenzung der Pronation zu bestehen.

Die übrigen kurzen Bänder des Fußrückens überbrücken, von den einzelnen Knochen jeweils divergierend, die rundumliegenden Gelenkspalte und bauen damit eine unvollständige inhomogene Faserplatte auf, die mit den Gelenkkapseln fest verwoben ist. Dies gilt auch für das sog. Lisfranc-Gelenk, das nur in seinen medialen Anteilen als Amphiarthrose aufzufassen ist. Die lateralen Tarsometatarsalgelenke haben eine dünne Gelenkkapsel und einen dorsoplantaren Bewegungsausmaß von ca. 30 Grad.

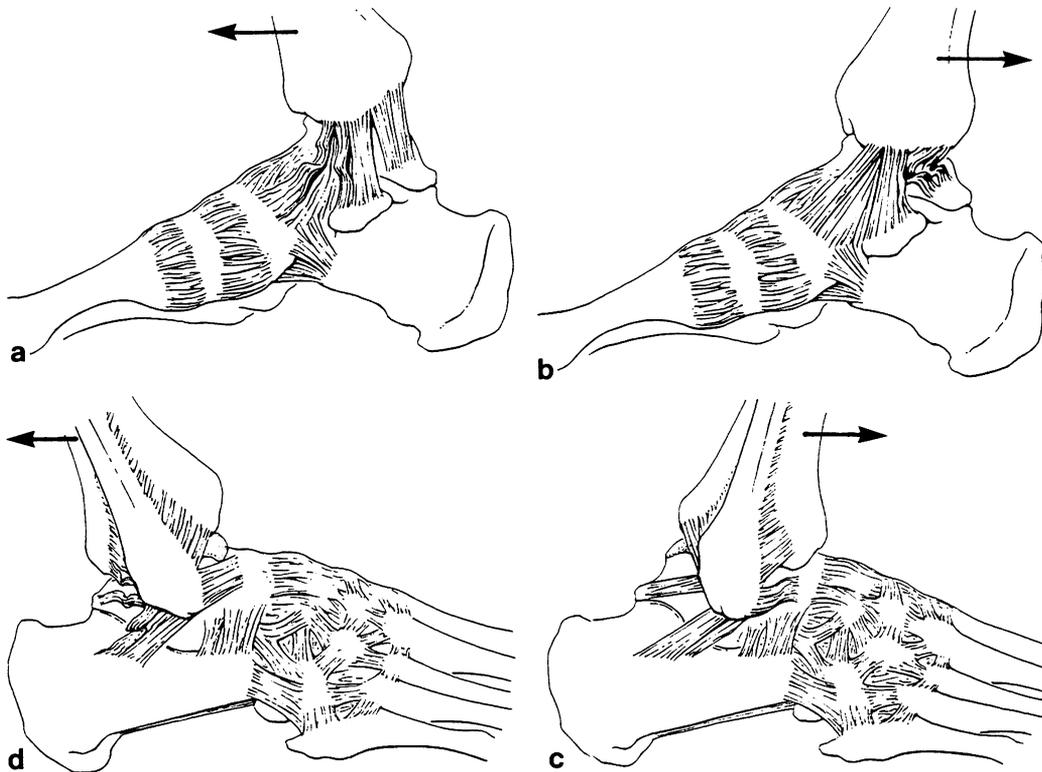


Abb. 5 a-d. Funktion der Bänder der Sprunggelenke bei der Begrenzung der Kinematik (Zeichnung nach dem Präparat).
a Endstellung der (Dorsal-)Extension. Ansicht von medial.
b Endstellung der (Plantar-)Flexion. Ansicht von lateral.
c Endstellung der (Dorsal-)Extension. Ansicht von medial.
d Endstellung der (Plantar-)Flexion. Ansicht von lateral

Auf der Plantarfläche werden die kurzen, den jeweils aneinandergrenzenden Knochen festanliegenden Bänder durch eine von ihnen kaum trennbare, längsausgerichtete Faserplatte bedeckt. Den größten Anteil davon stellt das Lig. plantare longum dar, das vom Vorderrand des Tuberculi calcanei und der plantaren Fläche des Kalkaneus entspringt und zuerst ganz leicht sanduhrförmig seitlich eingedellt, nach distal divergierend, bis zu den Basen der Mittelfußknochen zieht (Abb. 6). Nach medial zweigen von ihm das Lig. calcaneonaviculare plantare ab, das zusätzlich vom Sustentaculum tali entspringt, sowie das Lig. calcaneocuboideum plantare, das entsprechend seinem kürzeren Verlauf einen tieferen Bandanteil darstellt. Weitere tiefe Faserzüge zweigen zu den Ossa cuneiformia ab. Oberflächliche Züge überbrücken in ihrem distalen Verlauf den Sulcus tendinis musculi peronei longi, wobei allerdings der Umwickelungsbereich der Sehne des M. peroneus longus um die laterale Kante des Os cuboideum unbedeckt bleibt.

In die kurzen medialen Bänder strahlen in unterschiedlicher Weise 2 Muskelsehnen ein. Während die Sehne des M. tibialis anterior nur den Bereich des Tarsometatarsalgelenks des Hallux umfaßt, baut die Sehne des M. tibialis posterior eine aus 2 Bündeln bestehende, längsausgerichtete Faserplatte auf, deren medialer Anteil mit dem Ansatz des Lig. calcaneonaviculare plantare am Unterrand des Os naviculare verschmilzt. Ihr kleinerer lateraler Anteil zieht bis zu den Ossa cuneiformia intermedium und laterale und überkreuzt dabei schräg das Lig. calcaneonaviculare plantare.

Schließlich ist im Hinblick auf die große funktionelle Bedeutung der Aponeurosis plantaris hinzuweisen. Ihr fester Anteil entspringt tangential vom Tuberculo calcanei, bildet in der Mitte der Fußsohle eine massive Platte und strahlt nach distal in längsausgerichteten Faszikeln bis zu den

Gelenkkapseln der Metatarsophalangealgelenke und in das Lig. metatarsium transversum profundum aus (Abb. 6). Nach medial und nach lateral hin geht die Plantaraponeurose ohne scharfe Grenze in die aponeurotischen Faszien der randbildenden Muskeln über.

Von den Seitenkanten des mittleren Aponeurosenabschnitts ausgehend, ziehen sagittal ausgerichtete, ebenso feste Bindegewebsplatten, Septa plantaria, in die Tiefe, wodurch innerhalb der Fußsohle 3 längsausgerichtete osteofibröse Röhren entstehen (Abb. 6b). Bei Belastung der Fußsohle wirken sie einerseits als unterstützende Druckpolster, andererseits wird durch die strenggenommen hydrostatische innere Druckverteilung ihre Wandspannung weitgehend gleichmäßig minimiert. Das Septum plantare mediale zieht zu den plantaren Kanten von Os naviculare, Ossa cuneiformia mediale und Ossa metatarsale I, während das Septum plantare laterale zur plantaren Fläche des Ossa metatarsale V zieht und nach proximal eine Verbindung zur lateralen Kante des Lig. plantare longum eingeht. Variabel ausgebildet findet sich ein tiefer Bandzug zum 4. Zehengrundgelenk [5]. Alle longitudinalen Züge der Plantaraponeurose ziehen über die Zehengrundgelenke hinweg zu den Basen der Grundphalangen. Daraus ergibt sich bei der Dorsalflexion in diesen Gelenken ein Windenmechanismus, der z. B. beim Abrollvorgang die Spannung der Aponeurose erhöht [28].

Mechanik

Kinematik

Die beiden Sprunggelenke sind zusammen als eine Art Kardangelenk anzusehen, dessen Hauptachsen allerdings nicht senkrecht zueinander angeordnet sind (Abb. 7).

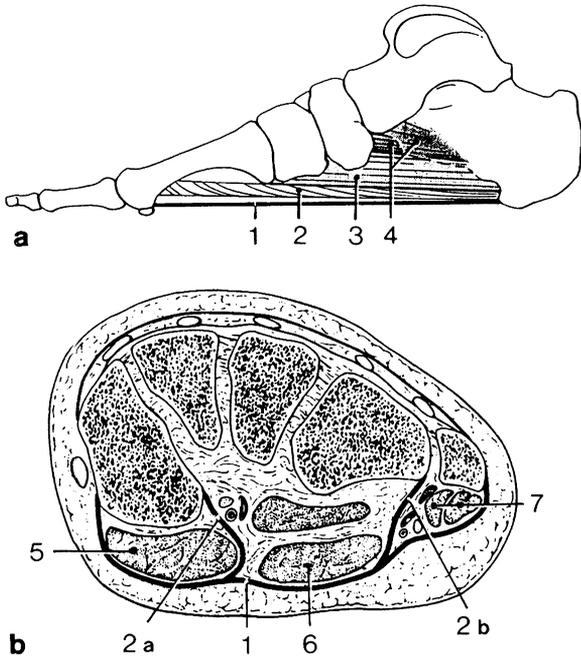


Abb. 6 a, b. Passive Längsverspannung des Fußes. **a** Ansicht von medial. **b** Frontaler Schnitt auf Höhe der Basis des Os metatarsale primum. 1 = Aponeurosis plantaris; 2 = Septa plantaria; 2a = Septum plantare mediale, 2b = Septum plantare laterale; 3 = Lig. plantare longum; 4 = Lig. calcaneonaviculare plantare; 5 = mediale Muskelloge – M. abductor hallucis; 6 = mittlere Muskelloge – M. flexor digitorum brevis, M. quadratus plantae; 7 = laterale Muskelloge – M. abductor digiti minimi, M. flexor digiti minimi brevis, M. opposens digiti minimi

Nach Helal u. Wilson [13] verläuft die Achse im oberen Sprunggelenk exakt durch die Spitzen der beiden Malleoli, also in einem Winkel von ca. 80° zur Längsachse der Tibia (68–88°). Die Achse des unteren Sprunggelenks verläuft schräg in einem nach vorne offenen Winkel von 42° zur Horizontalebene und in einem ebenfalls nach vorne offenen Winkel von 16° (nach [16] 23°) zur Längsachse des Fußes (Abb. 7 [13, 16, 25, 32]).

Die schräge Einstellung der Achsen des oberen und des unteren Sprunggelenks führen zu einer Koppelung der Bewegungsmöglichkeiten von Rück- und Vorfuß, wie dies von einer Reihe von Autoren gezeigt wurde [2, 16, 21]. Die Außenrotation des Unterschenkels bei aufgesetztem Fuß führt damit zu einer Supination des Vorfußes, die Innenrotation zu einer Pronation.

Dynamik des Fußes als Ganzheit

Alle längsausgerichteten Bänder und Bandanteile der Planta pedis verspannen gemeinsam das Längsgewölbe und sind nur unter morphologischen Gesichtspunkten in mehrere, vom Kalkaneus ausgehende Schichten zu trennen. Der größte Hebelarm und damit der größte Wirkungsgrad kommt dabei der Plantaraponeurose und den mit ihr zusammenhängenden Septa plantaria zu. Wesentlich kürzere Hebelarme besitzen das Lig. plantare longum und das Lig. calcaneonaviculare plantare, das dem Scheitel des Gewölbes direkt anliegt (Abb. 6 a).

Die genannten Bänder werden nicht nur bei vertikaler Belastung des Fußes im aufrechten ein- und beidbeinigen Stand in Abhängigkeit von der Kraftgröße gespannt [29], sondern werden in qualitativ ähnlicher Weise sowohl beim Aufsetzen der Ferse als auch beim Abstoßen des Vorfußes vom Boden beansprucht. Dies läßt sich in schematischen Kräftediagrammen zeigen, aus denen gleichzeitig die Verteilung der zug- und der druckbeanspruchten Bereiche abzuleiten ist (Abb. 8). In all diesen Fällen führt die Spannung der Plantaraponeurose zu einer Herabsetzung der Biegebeanspruchung der Mittelfußknochen [33].

Neben den passiven Strukturen nehmen an der Sicherung des Längsgewölbes vor allem beim Zehen- oder beim Fersenstand alle kurzen und langen Muskeln der Fußsohle teil, von denen zumindest eine Komponente ihrer Wirkungslinie längs ausgerichtet ist.

Die passive Verspannung des Quergewölbes erfolgt in erster Linie durch die massiven interossären Bänder und die queren Züge der tiefen plantaren Bänder der Fußwurzelknochen und der Basen der Mittelfußknochen. Erleichtert wird die Aufrechterhaltung des Quergewölbes durch die Überlagerung von Talus und Kalkaneus im Rückfuß (Abb. 1) und die z. T. ausgeprägte Keilform der beteiligten Knochen im Vorfußbereich. Demgegenüber ist die Bedeutung der Fasciculi transversi der Plantaraponeurose als gering aufzufassen.

Quer- und Längsgewölbe gemeinsam bestimmen die Ausdehnung der 3seitigen Unterstützungsfläche des Fu-

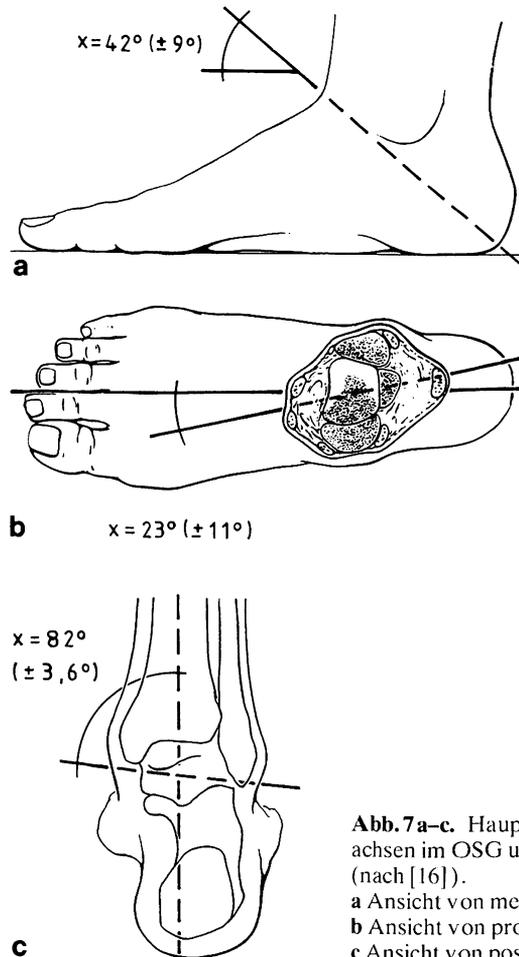


Abb. 7 a–c. Hauptbewegungsachsen im OSG und im USG (nach [16]).
a Ansicht von medial.
b Ansicht von proximal.
c Ansicht von posterior

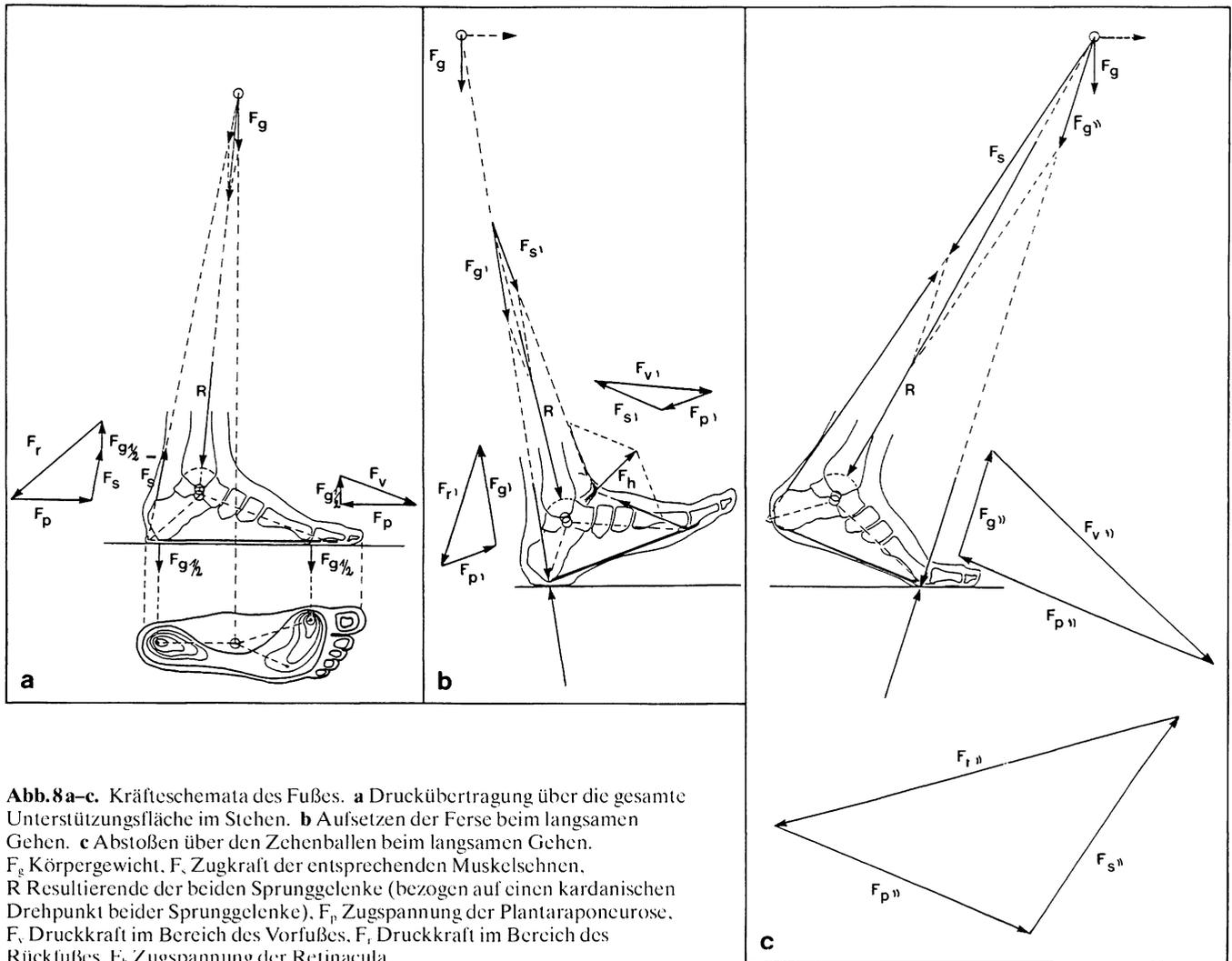


Abb. 8a-c. Kräfteschemata des Fußes. **a** Druckübertragung über die gesamte Unterstützungsfläche im Stehen. **b** Aufsetzen der Ferse beim langsamen Gehen. **c** Abstoßen über den Zehenballen beim langsamen Gehen. F_g Körpergewicht, F_s Zugkraft der entsprechenden Muskelsehnen, R Resultierende der beiden Sprunggelenke (bezogen auf einen kardanischen Drehpunkt beider Sprunggelenke), F_p Zugspannung der Plantaraponeurose, F_v Druckkraft im Bereich des Vorfußes, F_r Druckkraft im Bereich des Rückfußes, F_h Zugspannung der Retinacula

Bes. Allerdings zeigen pedographische Untersuchungen [6, 7] deutlich, daß die Unterstützungsfläche weder beim ruhigen aufrechten Stand noch im Gangzyklus gleichmäßig belastet wird. Ferse und Großzehenballen haben immer den größeren Anteil der Kräfte aufzunehmen, während zum lateralen Fußrand hin ein deutlicher Druckabfall erfolgt. Dazu kommt, daß die lateralen Tarsometatarsalgelenke besonders im Gegensatz zum Tarsometatarsalgelenke des Hallux, das als Amphiarthrose zu betrachten ist, einen Bewegungsspielraum für die Sagittalflexion in der Größenordnung von ca. 20° aufweisen. Daraus ist abzuleiten, daß dem Quergewölbe über seine aktiven Verspannungen die Aufgabe der Ausbalancierung in der Frontalebene zukommt. Dies spielt sowohl beim Einbeistand als auch in der Abstoßphase des Gehzyklus eine Rolle. In bezug auf die Anpassung der Fußsohle an Abweichungen der Unterlage von der Horizontalen bzw. an Unebenheiten ergänzt es damit die Funktion des unteren Sprunggelenks.

Aktiv an der Aufrechterhaltung bzw. Steuerung der Abflachung des Quergewölbes sind alle Muskeln beteiligt, von denen zumindest Anteile das Quergewölbe ganz oder teilweise überspannen. In diesen Fällen wirkt jeweils eine quere Teilkomponente an der Verspannung mit. Un-

ter den langen Unterschenkelmuskeln trifft dies besonders für den *M. peroneus longus* zu, der den Fußwurzelknochen anliegend, bis zur Basis des Os metatarsale I zieht. Ähnliche Verhältnisse betreffen den *M. tibialis posterior*, dessen nach lateral divergierende Sehnenbündel am Os metatarsale II und III inserieren. Den größten Wirkungsgrad besitzt allerdings das Caput transversum des *M. adductor hallucis*.

Die Verspannungen der Fußsohle bauen längs ausgerichtete osteofibröse Röhren auf, die ebenfalls die Gewölbe unterstützen. Ihre wichtigste Funktion scheint in einer Minimierung der lokalen Drücke auf Muskeln und Leitungsbahnen zu bestehen, was sowohl bei statischer, mehr noch bei dynamischer Beanspruchung gilt.

Bei der dynamischen Stoßdämpfung, wie sie beim Gehen, Laufen und Springen vielfach notwendig wird, spielen alle passiven und aktiven Bauteile des Fußes zusammen. Beginnend vom subkutanen Fersenpolster, dem mit seinen spiraligen Bindegewebssepten ein wichtiger Anteil in der Aufsetzphase zukommt [3, 4], findet über die gleichzeitig angespannten Längsbänder eine Einbeziehung des ganzen Fußes statt. Abgesehen vom Brems-effekt durch eine – entsprechend unterschiedlicher Erwartungshaltung – mehr oder minder vorausinnervierte

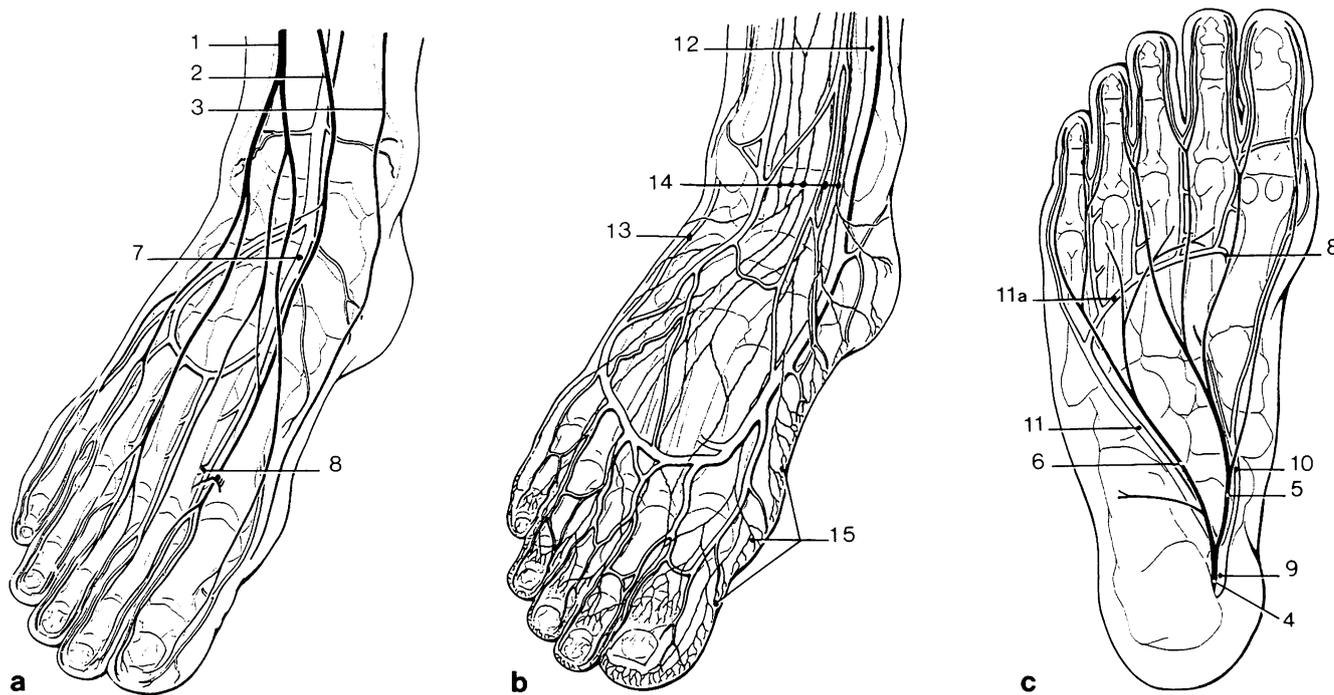


Abb. 9 a–c. Überblick über die wichtigsten Leitungsbahnen des Fußes. **a** Nerven und Arterien, Ansicht von dorsal/medial. **b** Venen und Lymphgefäße, Ansicht von dorsal/medial. **c** Nerven und Arterien, Ansicht von plantar. 1 = N. fibularis (peroneus) superficialis; 2 = N. fibularis (peroneus) profundus; 3 = N. saphenus; 4 = N. tibialis; 5 = N. plantaris medialis; 6 = N. plantaris lateralis; 7 = A. dorsalis pedis; 8 = A. plantaris profunda; 9 = A. tibialis posterior; 10 = A. plantaris medialis; 11 = A. plantaris lateralis; 11a = Arcus plantaris profundus; 12 = V. saphena magna; 13 = V. saphena parva; 14 = Hauptstämme des Lymphabflusses vom Fußrücken; 15 = Plantares Lymphgefäßnetz.

Muskulatur, spielt schließlich die kraftabhängige Verschiebung der Fußknochen zueinander den wichtigsten Anteil im Zusammenspiel der Bremsmechanismen. Zeitlupenaufnahmen belegen dies eindrücklich.

Topographie

Die wichtigsten Leitungsbahnen erreichen den Fuß über 2 Hauptstraßen (Abb. 9). Die A. tibialis posterior mit Begleitvenen und der N. tibialis ziehen dorsal des Malleolus medialis in einer tiefen Rinne zur Planta pedis. Das Retinaculum musculorum flexorum, das sich proximal zwischen Malleolus medialis und Kalkaneus ausspannt und nach distal in die Aponeurose des M. abductor hallucis übergeht, bedeckt diese Rinne oberflächlich. Dadurch entsteht eine osteofibröse Röhre, die neben den genannten Leitungsbahnen auch die Sehnen und Sehnenscheiden der Mm. tibialis posterior, flexor digitorum longus und flexor hallucis longus enthält und als Tarsaltunnel bezeichnet wird. In seinem distalen Bereich ist dieser Tunnel meist durch eine längsgestellte Bindegewebsplatte unterteilt, die vom Retinaculum musculorum flexorum entspringt. Im vorderen Teil des Tunnels verlaufen die A. tibialis posterior mit ihren Begleitvenen und der

N. plantaris medialis, während der N. plantaris lateralis im unteren Kanalanteil liegt [12]. Häufig ist allerdings die A. tibialis posterior bereits am proximalen Eingang des Tarsaltunnels zweigeteilt, die daraus entspringenden Aa. plantaris medialis und plantaris lateralis schließen sich in diesen Fällen den entsprechenden Nerven an. Innerhalb des Kanals ziehen aus der A. tibialis posterior noch vor ihrer Teilung die Rr. calcanei zur medialen Fläche des Kalkaneus.

Unter dem M. abductor hallucis divergieren medialer und lateraler Gefäßnervenstrang nach distal. Die A. plantaris lateralis und der N. plantaris lateralis überkreuzen den M. quadratus plantae und teilen sich auf Höhe der Basen der Mittelfußknochen in einen oberflächlichen und einen tiefen Anteil auf. Aus dem Arcus plantaris profundus, der entlang des Caput obliquum des M. adductor hallucis nach medial in die Tiefe führt, entspringen die Aa. metatarsales plantares. Die Aufteilung dieser Arterien erfolgt weiter distal als die der entsprechenden Nn. digitales plantares communes.

Der N. plantaris medialis verläuft entlang der Sehne des M. flexor digitorum longus und verzweigt sich auf Höhe der Basen der Mittelfußknochen in die Nn. digitales plantares communes, die den 1. bis 3. Interdigitalraum innervieren. Die A. plantaris medialis teilt sich bereits unter dem Bauch des M. abductor hallucis in einen oberflächlichen und einen tiefen Ast auf, die beide innerhalb der Eminentia plantaris medialis nach distal ziehen.

Eine weitere Gefäßnervenstraße zieht vom Unterschenkel zum Fußrücken. Schräg von lateral verläuft epifaszial der N. fibularis superficialis, dessen Äste sich fächerförmig über den Fußrücken ausbreiten. Bedeckt vom Muskelsehnenübergang des M. extensor hallucis longus erreichen die A. tibialis anterior und der N. fibularis profundus ebenfalls den Fußrücken. Dort ist der Arterienpuls zwischen den Sehnen der Mm. extensor hallucis longus und extensor digitorum longus zu tasten. Zusammen

mit den Muskeln wird die Arterie vom Retinaculum musculorum extensorum inferius bedeckt.

In der Tiefe des 1. Interdigitalraums anastomosiert die A. dorsalis pedis mit dem Arcus plantaris profundus. Wichtig erscheint die Beobachtung von Kliche et al. [17], wonach die vom Fußrücken kommende Arterie im Anastomosenbereich den größeren Durchmesser besitzt. Daraus ist zu folgern, daß die Arterien des Interdigitalraums vornehmlich von der A. dorsalis pedis gespeist werden. Die übrigen Metatarsal- und Digitalarterien stammen durchwegs aus dem Arcus plantaris profundus.

Die Venen bilden auf Höhe der Körper der Mittelfußknochen den Arcus venosus dorsalis pedis aus, der mit den tiefen Fußsohlenvenen zusammenhängt. Nach medial hin erfolgt der Hauptabfluß über die V. saphena magna, die im Regelfall vor dem Malleolus medialis nach proximal zieht. Aus dem Gebiet des lateralen Fußrandes und des Malleolus lateralis erfolgt der Abfluß zur V. saphena parva.

Der Hauptabfluß der Lymphgefäße konzentriert sich auf die ventromediale Seite der Sprunggelenke entlang der V. saphena magna. Dem dorsolateralen Nebenabfluß entlang der V. saphena parva kommt eine geringere Bedeutung zu [9, 18].

Literatur

- Bacon GE, Bacon PJ, Griffiths RK (1984) A neutron diffraction study of the bones of the foot. *J Anat* 139: 265–273
- Barnett CH, Napier JR (1986) The axis of rotation at the ankle joint in man. Its influence upon the form of the talus and the mobility of the fibula. *J Anat* 86: 1–9
- Blechschild EC (1934) Die Architektur des Fersenpolsters. *Morphol Jahrb* 73: 20–68
- Bojsen-Møller F, Flagstad KE (1975) Plantar aponeurosis and internal architecture of the ball of the foot. *J Anat* 121: 599–611
- Cralley J, Schuberth JM, Fitch KL (1982) The deep band of the plantar aponeurosis of the human foot. *Anat Anz* 152: 189–197
- Debrunner HU (1974) Zur Biomechanik des Fußes. *Orthopäde* 3: 127–134
- Debrunner HU (1985) Biomechanik des Fußes. Enke, Stuttgart
- Draenert K (1984) Neue Beobachtungen zur Anatomie und Funktion des oberen Sprunggelenkes. In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg) Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart
- Földi M, Kubik S (1989) Lehrbuch der Lymphologie. Fischer, Stuttgart
- Harper MC (1987) Deltoid ligament: An anatomical evaluation of function. *Foot&Ankle* 8: 19–22
- Heim UFA, Schmid-Giovanoli C (1984) Die Bedeutung der Membrana interossea und des Ligamentum interosseum als Stabilisation der Malleolengabel. In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg) Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart
- Heimkes B, Stotz S, Wolf K, Posel P (1987) Das Tarsaltunnelsyndrom. *Orthopäde* 16: 477–482
- Helal B, Wilson D (1988) The Foot. Churchill Livingstone, Edinburgh London Melbourne
- Hellige R, Gretenkorth K, Tillmann B (1981) Funktionelle Anatomie des oberen und unteren Sprunggelenkes. *Orthop Prax* 4: 299–304
- Hicks JH (1954) The mechanics of the foot; II. The plantar aponeurosis and the arch. *J Anat* 88: 25–31
- Inman VT (1976) The joints of the ankle. Williams & Wilkins, Baltimore
- Kliche A, Fritsch H, Schmidt HM (1990) Die Arterien der I. und II. Zehe beim Menschen. 8. Arbeitstagung der Anatomischen Gesellschaft, Würzburg
- Kubik S (1982) Die Anatomie des Fußes mit besonderer Berücksichtigung der Faszien, Fasziennähte und der Gefäßversorgung. In: Brunner U (Hrsg) Der Fuß. Huber, Bern
- Kummer B (1979) Die Biomechanik des Rückfußes. *Z Orthop* 117: 551–556
- Ludolph E, Hierholzer G (1986) Anatomie des Bandapparates am oberen Sprunggelenk. *Orthopäde* 15: 410–414
- Mann RA (1988) Gait analysis. In: Helal B, Wilson D (eds) The Foot. Churchill Livingstone, Edinburgh London Melbourne
- Mann RA (1986) Biomechanics of the foot and ankle. In: Mann RA (ed) Surgery of the foot. Mosley, St. Louis
- Müller-Gerbl M, Putz R (1990) Funktionsbezogene Anatomie des oberen Sprunggelenkes. In: Heim UFA (Hrsg) Die Pilon-tibial-Fraktur. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Müller-Gerbl M, Putz R (im Druck) Verteilungsmuster der subchondralen Mineralisierung in der Cavitas glenoidalis bei Normalpersonen, Sportlern und Patienten. *Z Orthop*
- Procter P, Paul JP (1982) Ankle joint biomechanics. *J Biomech* 15: 627–634
- Rehm KE, Schultheis KH (1984) Die endoskopische Anatomie des oberen Sprunggelenkes. In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg) Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart
- Reimann R, Anderhuber F (1980) Kompensationsbewegungen der Fibula, die durch die Keilform der Trochlea tali erzwungen werden. *Acta Anat* 108: 60–67
- Riede U, Müller M, Mihatsch MJ (1973) Biometrische Untersuchungen zum Arthroseproblem am Beispiel des oberen Sprunggelenkes. *Arch Orthop Unfallchir* 77: 181–194
- Sarrafian SK (1987) Functional characteristics of the foot and plantar aponeurosis under tibiotalar loading. *Foot&Ankle* 8: 4–18
- Schmidt IM, Jäger M (1984) Anatomische Studie an 400 Leichensprunggelenken unter besonderer Berücksichtigung möglicher Varianten bezüglich Beschaffenheit und Verlauf der fibulären Bänder (Ergebnisse und klinische Relevanz). In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg), Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart
- Siegler S, Block J, Schneck CD (1988) The mechanical characteristics of the collateral ligaments of the human ankle joint. *Foot&Ankle* 2: 234–242
- Silver RL, Dela Garza J, Rang M (1985) In: Helal B, Wilson D (eds) (1988) The foot. Churchill Livingstone, Edinburgh London Melbourne
- Tanaka J (1981) Die Bedeutung der langen Verspannungssysteme der Fußsohle für die Beanspruchung des Metatarsus. *Morphol Med* 1: 107–111
- Tillmann B (1977) Beitrag zur funktionellen Anatomie des Fußes. *Orthop Prax* 13: 505–509
- Tillmann B (1987) Bewegungsapparat. In: Rauber/Kopsch, Anatomie des Menschen. Bd I. Thieme, Stuttgart
- Volkman R (1973) Zur Anatomie und Mechanik des Lig. calcaneonavicular plantare sensu strictiori. *Anat Anz* 134: 460–470
- Wirth CJ, Küsswetter W, Jäger M (1984) Biomechanik und Pathomechanik des oberen Sprunggelenkes. In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg) Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart
- Zwipp H, Tscherner H (1984) Die Rotationsstabilität des Subtalgelenkes als Entität. In: Hackenbroch MH, Refior HJ, Jäger M, Plitz W (Hrsg) Funktionelle Anatomie und Pathomechanik des Sprunggelenkes. Thieme, Stuttgart

Prof. Dr. R. Putz
Anatomische Anstalt
Lehrstuhl I
Pettenkofferstraße 11
W-8000 München 2
Bundesrepublik Deutschland