

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Asklepios Klinik Altona/ Klinikum Stephansplatz

Prof. Dr. J. V. Wening

Morphologische Untersuchungen zum Vergleich des Syndesmosenkomplexes mit dem Seitenbandkomplex des oberen Sprunggelenkes

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Nele Muro Bushart
aus Lima, Perú

Hamburg 2018

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 04.06.2019**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. Volker Wening

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: Prof. Dr. Michael Amling

1. ARBEITSHYPOTHESE UND ZIELSETZUNG.....	4
2. EINLEITUNG.....	4
2.1. Definition.....	4
2.2. Topographische Anatomie.....	7
2.3. Funktionelle Anatomie und Biomechanik.....	11
2.4. Histoanatomie.....	15
3. MATERIAL UND METHODEN.....	18
3.1. Präparation des Syndesmosenkomplexes.....	19
3.2. Präparation des lateralen Seitenbandkomplexes.....	21
3.3. Aufarbeitung zur Lichtmikroskopie.....	22
3.4. Aufarbeitung zur Rasterelektronenmikroskopie.....	23
3.5. Untersuchung, Vergleich und Quantifizierung.....	23
3.5.1. Lichtmikroskopie.....	23
3.5.2. Rasterelektronenmikroskopie.....	24
3.5.3. Spektralanalyse.....	24
4. ERGEBNISSE.....	25
4.1. Anatomische Präparation und Fotodokumentation.....	25
4.2. Lichtmikroskopische Auswertung und Bilddokumentation.....	26
4.2.1. Qualitative Auswertung.....	26
4.2.2. Quantitative Auswertung.....	29
4.3. Rasterelektronenmikroskopische Bilddokumentation und Auswertung.....	33
4.4. Spektraluntersuchung.....	36
5. DISKUSSION.....	37
6. ZUSAMMENFASSUNG.....	47
7. ANHANG.....	49
7.1. Abbildungsverzeichnis.....	49
7.2. Tabellenverzeichnis.....	49
7.3. Diagrammverzeichnis.....	49
7.4. Abkürzungen.....	50
7.5. Danksagung.....	51
7.6. Lebenslauf.....	52
7.7. Eidesstattliche Erklärung.....	53
7.8. Literatur- und Quellenverzeichnis.....	54

1. Arbeitshypothese und Zielsetzung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob morphologisch ein Unterschied zwischen dem lateralen Bandkomplex und der tibiofibularen Syndesmose besteht, welcher das unterschiedliche Outcome von Verletzungen der lateralen Bandstrukturen des oberen Sprunggelenkes und die unterschiedliche Häufigkeit von Verletzungen einzelner Bandstrukturen innerhalb eines Bandkomplexes erklären kann.

Vergleichende mikrostrukturelle Studien aller Bänder am oberen Sprunggelenk konnten zum Zeitpunkt des Beginns der Arbeit nach Sichtung von Medline/Pubmed, Cochrane Database/Wiley Online Library, Google Scholar sowie anatomischer und orthopädisch/unfallchirurgischer Literatur nicht gefunden werden.

Weiterhin sollen die anatomische Lokalisation und makroskopische Ausbildung der Bänder des oberen Sprunggelenkes definiert und Aussagen bisher vorliegender Untersuchungen gegenübergestellt werden.

2. Einleitung

2.1. Definition

Die distale Bandverbindung zwischen Tibia und Fibula bildet den proximalen Teil des Sprunggelenkes in Form der Sprunggelenksgabel. In dieser ist der Talus eingefasst. Sie wird durch die Syndesmose stabilisiert. Es werden vier Anteile der Syndesmose unterschieden:

- Lig. tibiofibulare anterius (LTFA) – vorderer Bandanteil (vordere Syndesmose),
- Lig. tibiofibulare interosseum (LTFI) – Lig. interosseum, distales Ende der Membrana interossea, laut einigen Autoren ein eigenes Band (Lutz 1941, Fick 1904, Bartonicek 2003, Hermans et al. 2011, Sarrafian 1983),
- Lig. tibiofibulare posterius (LTFP) – hinterer Bandanteil (hintere Syndesmose),
- Membrana interossea (MI) – langstreckige, dünne Membran zwischen Schien- und Wadenbein, die hier an das Lig. interosseum grenzt (Sarrafian 1983).

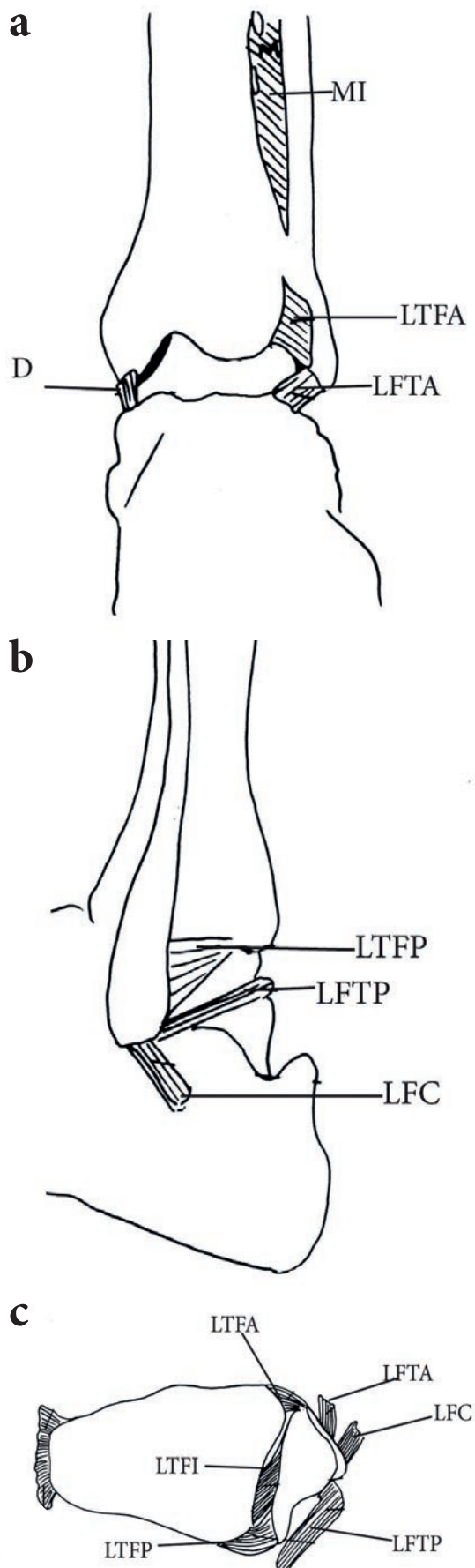


Abbildung 1: Oberes Sprunggelenk von (a) ventral, (b) lateral und (c) transversal. Syndesmose mit LTFA, LTFI, LTFP und MI. Nach proximal MI, nach distal Seitenbandkomplex mit LFTA, LFC und LFTP. Medial D (Zeichnung MB 2016).

Obwohl es sich bei der tibiofibularen Syndesmose um eine Bandhaft handelt (Zwipp 1994), also kein Gelenk im eigentlichen Sinne, wird der Begriff der Syndesmosenverletzung synonym zu einer Bandverletzung eines Gelenkes verwendet (Hermans et al. 2011).

Bei der anatomischen Definition dieser Einzelstrukturen bestehen in der anatomischen, unfallchirurgischen und orthopädischen Literatur zahlreiche Variationen bezüglich der Nomenklatur, Bandverlauf, Ansatz, Ursprung, Anzahl, Längen- und Breitenangaben der Bänder und Biomechanik.

Ebraheim und Hermans definieren vier Syndesmosenbänder mit den Ligg. tibiofibulare anterius, interosseum, posterius und dem zusätzlichen Lig. transversum (Ebraheim et al. 2006, Boonthathip 2010).

Ältere anatomische Literatur sowie spezialisierte Sprunggelenks- und Fußliteratur gehen von drei Hauptbändern aus und rechnen das Lig. transversum der hinteren Syndesmose zu (Xenos and Hopkinson 1995, Ebraheim et al. 2006, Lutz 1941, Fick 1904, Poirier 1892, Quenu 1907, Sarrafian 1983, Ogilvie-Harris et al. 1994, Bartonicek 2003, Williams et al. 2015).

Vereinzelt wird die Membrana interossea auch als 5. Bandstruktur der Syndesmose gesehen (Zwipp 1994). In der aktuellen allgemeinen Anatomieliteratur (Waldeyer 2012, Schiebler and Korf 2007) sowie in der klinisch radiologischen Diagnostik fand das kräftige Lig. tibiofibulare interosseum bisher in der Regel keine Erwähnung, man sprach dort lediglich von zwei Bändern, dem Lig. tibiofibulare anterius und posterius. Das Lig. interosseum wurde häufig ausschließlich als distaler Teil der Membrana interossea gesehen (Waldeyer 2012, Schiebler and Korf 2007). Andere Autoren beschreiben das Lig. tibiofibulare interosseum als eigene Bandstruktur (Lutz 1941, Hermans et al. 2011, Fick 1904).

Jüngst wird die Rolle des Lig. interosseum auch in der radiologischen Fachliteratur zunehmend erkannt und hervorgehoben (Thierfelder et al. 2018).

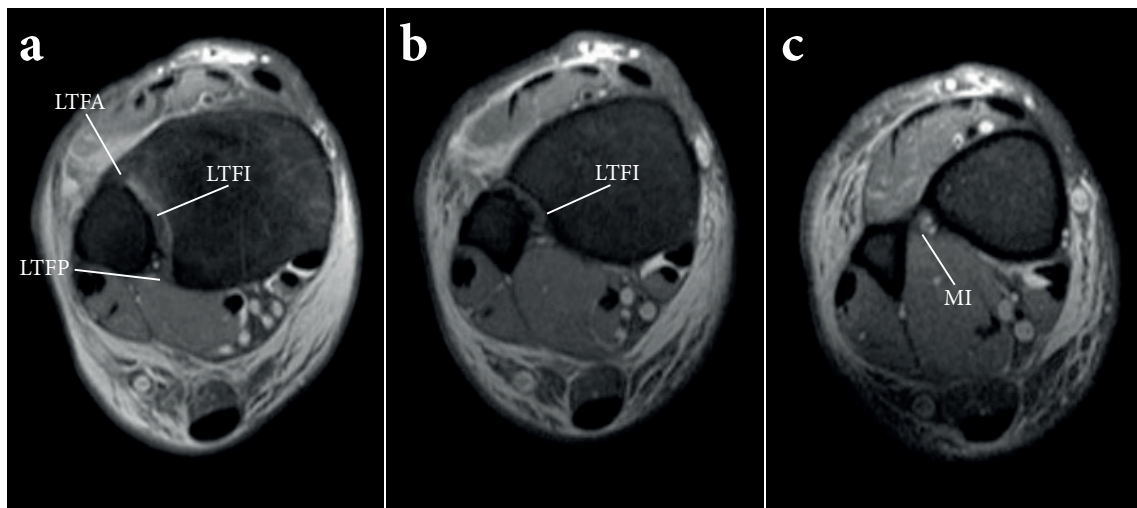


Abbildung 2: MRT eines rechten oberen Sprunggelenkes, axiale Schichten beginnend (a)-(c) von distal nach proximal: LFTA, LTFI, LTFP und MI (AKA Altona, Radiologie).

Lig. collaterale laterale cruris fasst den lateralen Seitenbandkomplex zusammen. Er besteht aus:

- Lig. fibulotalare anterius (LFTA), vorderer Bandanteil,
- Lig. fibulocalcaneare (LFC), mittlerer Bandanteil,
- Lig. fibulotalare posterius (LFTP), hinterer Bandanteil.

Gemeinsam mit dem Lig. collaterale mediale sichert der laterale Seitenbandkomplex das obere Sprunggelenk seitlich durch die Verbindung der Malleolengabel mit Talus und Calcaneus (Waldeyer 2012).

Bei der Planung einer operativen Bandrekonstruktion ist man auf exakte topographische Beschreibungen angewiesen. Beim Studium der Seitenbänder in der gängigen anatomischen Literatur (Waldeyer 2012, Schiebler and Korf 2007) sind die Angaben unpräzise und entsprechen nicht der exakten Topographie (van den Bekerom et al. 2008).

2.2. Topographische Anatomie

Die *vordere Syndesmose* beginnt am Tuberculum anterius tibiae (Tubercule de Chaput) 5 mm kranial der Gelenkfläche (Williams et al. 2015, Hermans et al. 2011, Bartonicek 2003). Von dort zieht das Band nach lateral distal zum Tuberculum anterius fibulae (Hermans et al. 2011, Fick 1904, Bartonicek 2003). Die vordere Syndesmose liegt ventral direkt unter der Haut. Sie ist ein kräftiges, glänzendes Band (Fick 1904) mit flacher, trapezartiger Form und nach oben kürzer und nach unten länger werdenden Bündeln (Fick 1904, Hermans et al. 2011). Sie liegt zu 20% intraartikulär (Hermans et al. 2011). Manchmal ist sie durch schmale Fettstreifen in mehrere Zügel (3 bis 5) geteilt (Fick 1904, Sarrafian 1983) und wird von Gefäßen aus einem ventralen fibularen arteriellen Ast perforiert (Sarrafian 1983, Hermans et al. 2011, Taser et al. 2006, Bartonicek 2003). Die Faserzüge sind fest in der dünnen Kortikalis verankert (Bartonicek 2003). Die unteren Fasern der vorderen Syndesmose erreichen das Lig. fibulotalare anterius (Sarrafian 1983, Williams et al. 2015).

Das *Ligamentum tibiofibulare interosseum* ist anatomisch als distaler Anteil der Membrana interossea definiert. Die steilen, schräg abwärts von der Tibia zur Fibula in lateral-distaler-anteriorer Richtung verlaufenden Fasern, sind von Fettgewebe durchzogen (Hermans et al. 2011, Fick 1904). Wenige Fasern verlaufen gegenläufig (Ebraheim et al. 2006). Das Band ist etwa 2-3 cm breit, beginnt ca. 4-5 cm oberhalb der Gelenkfläche und endet etwa 1 cm oberhalb des Gelenkspaltes (Bartonicek 2003, McKeon et al. 2012). Es entspringt aus der dreiecksförmigen Fläche der Incisura tibiofibularis als kurze Bandmasse und zieht einerseits distal zum Tuberculum anterius tibiae und andererseits fibular bis oberhalb der tibiofibularen Gelenkfläche an den medialen Schaft. Seine Fasern bilden somit in der sagittalen Ebene räumlich ein Netzwerk in Form einer Pyramide, deren Spitze in die Membrana interossea übergeht (Sarrafian 1983, Hermans et al. 2011, Bartonicek 2003). Der obere Teil wird durch einen arteriellen Ast der A. fibularis perforiert (Bartonicek 2003, McKeon et al. 2012). Dazwischen befindet sich reichlich vaskularisiertes lockeres Bindegewebe (Lutz 1941, Hermans et al. 2011, Fick 1904).

Die *hintere Syndesmose* ist ein dickeres und breiteres Band als die vordere Syndesmose (Hermans et al. 2011, Bartonicek 2003). Sie hat zwei Komponenten, eine tiefe und eine oberflächliche. Von manchen Autoren wird der tiefe Anteil als eigenes Band gewertet und als Lig. transversum bezeichnet. Dieses bildet eine Art dorsale Gelenk- lippe (Sarrafian 1983, Hermans et al. 2011). Es entspringt am hinteren Rand der Incisura fibularis tibiae vom Tuberculum posterius und zieht zum Tuberculum posterius der Fibula (Hermans et al. 2011, Bartonicek 2003). In 81,8% der Fälle reichen einige Fasern bis zum Lig. fibulotalare posterius (Hermans et al. 2011, Golano et al. 2016). Es besteht ein kontinuierlicher Übergang zum Lig. interosseum (Ebraheim et al. 2006, Bartonicek 2003).

Die *Membrana interossea cruris* ist eine straffe bindegewebige Verbindung zwischen den Margines interossei tibiae et fibulae. Proximal und distal sind Lücken für durch- tretende Blutgefäße der Membrana interossea vorhanden (Schiebler and Korf 2007). Dünne aponeurotische Fasern verlaufen zwischen proximaler und distaler Syndesmo- senhaft, deren schwächsten und großflächigsten Teil sie darstellt (Zwipp 1994).

Die *Gelenkkapsel* des oberen Sprunggelenkes ist an den Knorpelgrenzen befestigt, die Malleolen liegen frei. Sie ist vorn und hinten dünn. Ventral ist sie mit den Sehnen- scheiden der Mm. extensores digitorum und hallucis verwachsen. Außen- und innen- seitig ziehen die Kollateralbänder (Ligg. collaterale) verstärkend in die Gelenkkapsel (Waldeyer 2012).

Das *Lig. fibulotalare anterius* entspringt an der distalen Fibula am vorderen Rand 3 bis 10 mm oberhalb der Spitze. Es ist dünn, trapezförmig und liegt dicht unter der Haut. Medial steht es in enger Verbindung zur Gelenkkapsel (Fick 1904, van den Bekerom et al. 2008, Sarrafian 1983) und setzt am Eingang des Tarsaltunnels am Corpus tali an (van den Bekerom et al. 2008, Fick 1904, Kumai et al. 2002). Es besteht in 33% aus einem, in 57% aus zwei und in 10% aus drei Bündeln (Edama et al. 2018).

Das *Lig. fibulocalcaneare* entspringt am vorderen Rand des lateralen Malleolus unmit- telbar unterhalb des Ursprungs des Lig. fibulotalare anterius (Sarrafian 1983). Es ist etwas weniger als ein Zentimeter von der Fibulaspitze entfernt und setzt über dem Pro- cessus trochlearis der Mm. peronei am Calcaneus an (van den Bekerom et al. 2008, Boonthathip 2010, Sarrafian 1983). Es verläuft unter den Sehnnenscheiden der Mm. pe- ronei (Sarrafian 1983) und bildet mit diesen einen spitzen Winkel, der Bandansatz ist häufig gespalten (Boonthathip 2010, Fick 1904). Zur Fibulaspitze ziehen Fasern aus

dem unteren Teil des Lig. fibulotalare anterius, die wiederum mit dem Lig. fibulocalca-neare verbunden sind (Sarrafiian 1983). Das Band verläuft extrakapsulär (Zwipp 1994).

Das *Lig. fibulotalare posterius* ist das kräftigste der Seitenbänder. Der Ursprung liegt dorsal kaudal der medialen Gelenkfläche des Malleolus lateralis, hinter der Knorpelgrenze, ca. 1 cm von der Fibulaspitze entfernt (Fick 1904, van den Bekerom et al. 2008, Boonthathip 2010). Sein Ansatz erstreckt sich fast über den gesamten nichtartikulierenden Teil des posterioren Corpus tali (Gursoy et al. 2015). Es bildet den Boden für den Tunnel der Sehne des M. flexor hallucis longus, die das Band in der Mitte kreuzt (Boonthathip 2010, van den Bekerom et al. 2008, Sarrafiian 1983). Der fibulare Ursprung wird vom superioren fibularen Retinaculum bedeckt. Das Lig. fibulotalare posterius liegt intrakapsulär, aber extrasynovial (van den Bekerom et al. 2008, Taser et al. 2006). Es besitzt eine trapezoidale Form und regelhaft zwei kurze anteriore transverse Faserbündel sowie ein langes posteriores Faserbündel (Gursoy et al. 2015). Häufig geht der proximale Anteil in die hintere Syndesmose über. Manchmal strahlen Faserbündel in die hintere Kapselwand des oberen Sprunggelenkes oder die Sehnen-scheide des Großzehenbeugers ein (Fick 1904).

Autor	vordere Syndesmose	Lig. interosseum	hintere Syndesmose	Untersuchte OSG
Bartonicek 2003	Länge prox. 6 mm lang, Breite 4 mm, Dicke 3 mm, Länge Mitte ca. 12 mm, Breite 10 mm, Dicke 4 mm, Länge distal 17 mm, Breite 4 mm, Dicke 2 mm, Horizontal 30°.	Höhe 2-3 cm.	Länge Oberkante 13 mm, Länge Unterkante 24 mm, Breite 18 mm, Dicke 6 mm.	30
Ebraheim 2006	Länge prox. 8,89±2,90 mm, Breite 4,92±1,21 mm, Dicke 1,76±0,26 mm, Länge Mitte 15,46±4,22 mm, Breite 8,28±2,20 mm, Dicke 2,62±0,53 mm, Länge distal 20,57±5,36 mm, Breite 3,76±0,52 mm, Dicke 2,15±0,70 mm, Horizontal 35±5°, Sagittal 65±7°.	Länge prox. 5,75–7,55 mm, Länge distal 8,23–12,55 mm, Breite fib. 20,00–22,45 mm, Breite tib. 17,05–18,45 mm, Dicke 3,80–5,25 mm.	Länge prox. 3,35–21,20 mm, Länge distal 6,40–32,50 mm, Breite 11,10–21,45 mm, Dicke tib. 4,40–8,95 mm, Dicke fib. 8,00–11,40 mm, Länge Lig. transv. 25,65–42,85 mm, Breite LT 3,75–4,40 mm, Dicke LT 1,65–2,60 mm, Horizontal 20±5°, Sagittal 85±7°.	42
Lilyquist 2016	Länge prox. sup. 4,9±1,2 mm, Länge prox.inf. 6,0±1,7 mm, Breite tib. 5,6±2,1 mm, Breite fib. 7,1±2,4 mm, Länge Mitte sup. 7,2±1,7 mm, Länge Mitte inf. 10,2±2,2 mm, Dicke tib. 11,9±2,5 mm, Dicke fib. 9,8±2,6 mm, Länge dist. sup. 11,1±2,4 mm, Länge dist. inf. 13,6 ±2,3 mm, Dicke tib. 5,0±1,4 mm, Dicke fib. 5,7±1,1 mm.	Länge 31,8±7,9 mm, Dicke tib. 22±7,5 mm, Dicke fib. 23,1±5,6 mm.	Länge sup. 6,6±0,9 mm, Länge inf. 17,7±3,4 mm, Dicke tib. 16,1±2,3 mm, Dicke fib. 17,3±3,6 mm.	20
Williams 2015	Länge 7,8 (6,7-9,0) mm, Horizontal 33,1° (25,8-40,4°).	Länge prox. 7,2 (5,7-8,8) mm, Horizontal 34°, Länge B. 10,1 (8,3-12,0) mm, Horizontal 34,7°, Länge distal 6,3 (5,3-7,3) mm, Horizontal 39,8°.	Länge 11,6 mm (10,1-13,1 mm), Horizontal 26,5° (21,7-31,2°), Länge tief 12,7 mm (10,6-14,7 mm), Horizontal 19,2° (13,3-25,2°).	16
Autor	Lig. fibulotalare anterius	Lig. fibulocalcaneare	Lig. fibulotalare posterius	Untersuchte OSG
Raheem 2011	Länge 10-21 mm, Länge Pl.Flex. 18 ±9,8 mm, Länge Do.Flex. 14,5 ±6,3 mm, Breite 5-15 mm.	Länge 14-23 mm, Länge Pl.Flex 17 ±5,6 mm, Länge Do.Flex. 15,5 ±6,3 mm, Breite 5-10 mm.		20
Boonthathip 2010	Länge 21,2±5,6 mm, Breite 4,4±1,0 mm.	Länge 31,0±6,0 mm, Breite 4,6±1,0 mm.	Länge 27,8±3,6 mm, Breite 8,7±3,0 mm.	10 MRT
van den Bekerom 2008	Länge ca. 15-20 mm, Breite ca. 6-10, Dicke 2 mm, Horizontal 25°, Sagittal 47°.	Länge ca. 20 mm, Breite 4–5.5 mm, Durchmesser 4,8 mm, Horizontal 40°, Sagittal 51°.	Länge ca. 30 mm, Breite fib. 5 mm, Dicke 5–8 mm.	0 Review
Wenny 2015	Länge prox.post. 12,9 ± 2,64 mm, Länge pl.ant. 11,38 ± 2,25 mm, Länge pl.ant. 11,38 ± 2,25 mm, Breite fib.tib. 6,50 ± 1,51.	Länge cran.post. 20,9 ± 2,72 mm, Länge caud.ant. 21,59 ± 2,70 mm, Breite tal.calc. 7,66 ± 1,68 mm, Breite fib.tib. 6,63 ± 1,61 mm.	Länge cran.post. 16,41 ± 2,58 mm, Länge caud.ant. 17,38 ± 2,34 mm, Breite tal.calc. 5,09 ± 1,31 mm, Breite fib.tib. 4,74 ± 1,15 mm.	17

Tabelle 1: Maße des Syndesmosen- und Seitenbandkomplexes (Bartonicek 2003, Ebraheim et al. 2006, Williams et al. 2015, Raheem and O'Brien 2011, Boonthathip 2010, van den Bekerom et al. 2008, Lilyquist et al. 2016, Wenny et al. 2015).

2.3. Funktionelle Anatomie und Biomechanik

Im gesunden Sprunggelenk sitzt der Talus auch bei Bewegung passgenau in der Malleolengabel (Schenk 1978). Grundlage hierfür sind die syndesmotische Verklammerung der Malleolengabel und die Seitenbänder am oberen Sprunggelenk.

Dreidimensional bildet der Talus vereinfacht den Ausschnitt eines Kegels mit kleiner medialer, in der Aufsicht elliptischer, und größerer lateraler, kreisförmiger Grundfläche. Seine Gelenkfläche ist trapezförmig mit einem größeren vorderen und einem schmalen hinteren (proximalen) Durchmesser mit bis zu 6 mm Unterschied (Schenk 1978).

Daher wird die Malleolengabel bei Dorsalflexion gespreizt und bei Plantarflexion enger gestellt.

Durch die besondere Form und Stellung des Talus entsteht aus dem oberen Sprunggelenk gemeinsam mit dem unteren Sprunggelenk funktionell ein sogenanntes Kardangelen (Kreuzgelenk) mit dem Talus als Verbindung. Diese Bewegungskombination wird in der Literatur auch als Mauerschellenbewegung bezeichnet, hierdurch erreicht der Fuß zum Stehen und Gehen die ausreichende Beweglichkeit (Schenk 1978). Im Bewegungsablauf entspricht dies überwiegend einem Gleiten (Seiler 1999).

Durch die unregelmäßige Form des Talus kommt es im oberen Sprunggelenk medial zu wechselnden Durchtrittspunkten der Bewegungsachsen. Barnett und Napier sehen im Gegensatz zu anderen Autoren (Seiler 1999, Schenk 1978, Hawe et al. 1989) ein biphasisches Achsenkonzept (Barnett and Napier 1952). Inman und Kapjandi postulieren eine monophasische Bewegungsachse (Inman 1976). Untersuchungen (Zwipp 1994) ergaben für die Dorsalflexion eine Scharnierbewegung und für die Plantarflexion eine Schraubbewegung.

Als Kompromiss, vor allem für klinische Zwecke, erscheint eine singuläre monophasische Gelenkachse für den gesamten dorsoplantaren Bewegungsablauf ausreichend. Diese verläuft quer von der Innen- und Außenknöchelspitze und parallel zur lateralen Talusrollenkante (Seiler 1999). Die Bewegungsachse reicht von 6° ventral lateral nach 8° kranial medial (Zwipp 2014).

Der Bewegungsumfang im oberen Sprunggelenk beträgt in Dorsalextension 20 bis 30° und in Plantarflexion 40 bis 50° (Neumann 2012). Der Syndesmosenkomplex hält

dabei die Integrität zwischen der distalen Tibia und Fibula aufrecht. Er widersteht den axialen Rotations- und Translationskräften, die den Knochen trennen (Ebraheim et al. 2006).

Bei Dorsalextension im oberen Sprunggelenk wird die Fibula geringfügig nach proximal und nach lateral verschoben sowie um ca. 2° außenrotiert. Dagegen gleitet sie während der Plantarflexion nach distal und medial (Waldeyer 2012, Grass et al. 2000). Bei extremer Dorsalflexion kann der intermalleolare Abstand um 1 bis 1,5 mm zunehmen (Grass et al. 2000).

Etwa 4/5 der messbaren physiologischen Syndesmosenerweiterung lässt sich bei intaktem Außenbandapparat allein auf das typische Biegeverhalten des Wadenbeines zurückführen. Das Wadenbein nimmt zwischen 17 bis 30% der auf den Unterschenkel einwirkenden axialen Druckkräfte auf, insbesondere bei Dorsalextension des oberen Sprunggelenkes und valgischer Stellung des Beines. Der Belastungstransfer wird allein durch die Durchtrennung der Membrana interossea nur punktuell verändert, während die Durchtrennung der tibiofibularen Syndesmose das Wadenbein fast vollständig entlastet (Seiler 1999).

Ein Lateralversatz des Talus um 1 mm verringert die Tibiagelenkfläche um 42% (Hermans et al. 2011, Ramsey and Hamilton 1976).

Die *vordere Syndesmose* beschränkt die Verschiebung von Fibula und Tibia nach vor- und rückwärts sowie das Auseinanderdrängen der Knöchelgabel. Sie trägt zu 35% zur Stabilität bei (Hermans et al. 2011, Ogilvie-Harris et al. 1994).

Bei Außenrotation spannt sich die vordere Syndesmose an, die hintere entspannt (Colville et al. 1990).

Die vordere Syndesmose wird unter Valgusaußenrotation gegen Dorsalflexionsstellung stärker gedehnt. Klinisch entsteht bei axialer Belastung und gleichzeitiger forcierter Außenrotation in mäßiger Dorsalflexion die isolierte Ruptur der vorderen Syndesmose (Seiler 1999, Funk 2011, Colville et al. 1990).

Das *Lig. interosseum* verhindert jede größere Distanzierung der Fibula gegenüber der Tibia (Lutz 1941). Es fungiert als Feder, die bei Dorsalflexion und Bewegung des Talus ein leichtes Auseinanderweichen von Fibula und Tibia erlaubt und beim Fersenauftritt sowie bei Belastung im talocruralen Gelenk als Puffer im Gehakt dient (Hermans et al. 2011). Durch seine zentrale Lokalisation und sprungfederhafte Laxizität erlaubt es eine physiologische tibiofibulare Beweglichkeit (Williams et al. 2015). Es trägt zu 22% zur Stabilität bei (Ogilvie-Harris et al. 1994). Das *Lig. interosseum* wird von einzelnen Autoren als das stärkste Band bezeichnet, mit einer Reißkraft von $822 \pm 298\text{N}$ (Hoefnagels et al. 2007).

Das *Lig. interosseum* ist bei Supinations-Eversions-, Pronations-Abduktions- oder Pronations-Eversionsverletzungen betroffen (Lauge-Hansen 1950) und somit als Folge der Verletzung anderer Syndesmosenanteile.

Die *hintere Syndemose* ist kräftiger als die vordere Syndesmose und steifer (Beumer et al. 2003). Das Band beschränkt ebenfalls die Verschiebung beider Knochen sowie die Spreizung der Knöchelgabel (Lutz 1941). Es trägt zu 9% zur Stabilität bei, das *Lig. transversum* zu 33% (Hermans et al. 2011, Ogilvie-Harris et al. 1994).

Die hintere Syndesmose spannt sich bei Dorsalflexion an. Sie reißt bei Supinations-Eversions-, Pronations-Abduktions- oder Pronations-Eversionsverletzung (Hermans et al. 2011, Lauge Hansen 1963) sowie bei extremer Dorsalflexion (Colville et al. 1990).

Eine Durchtrennung der vorderen Syndesmose erweitert die Gabel um 0,5 bis 4 mm, mit zusätzlicher Durchtrennung des gesamten *Lig. interosseum* um 7,3 mm. Mit Durchtrennung der hinteren Syndemose ist nur eine minimale Erweiterung messbar. Werden auch die *Membrana interossea* und das Deltaband durchtrennt, erweitert sich der Gelenkspalt auf 10 mm (Xenos and Hopkinson 1995).

Weitere Stabilisatoren im oberen Sprunggelenk sind die Seitenbänder. Diese verhindern u.a. beim Gehen den Rückschub der Tibia gegen den Talus sowie ein seitliches Verkanten des Fußes (Schiebler and Korf 2007).

Analog zu den Kreuzbändern am Kniegelenk entsteht dabei gemeinsam für die medialen und lateralen Außenbänder der Eindruck einer Gelenkkette (Seiler 1999).

Das *Lig. fibulotalare anterius* verhindert die Vorwärtsverlagerung des Talus. Es wird bei der Inversion, Innenrotation und Plantarflexion gespannt (van den Bekerom et al. 2008, Williams et al. 2015, Neumann 2012, Colville et al. 1990).

Neuere Untersuchungen zeigen ein reziprokes Verhalten beim zweibündeligen *Lig. fibulotalare anterius*. Der obere Zügel spannt sich bei Inversion an, der untere spannt sich reziprok gemeinsam mit dem *Lig. fibulocalcaneare* an (Vega et al. 2018). Die Länge des *Lig. fibulotalare anterius* nimmt vor allem bei Plantarflexion und Supination zu, die des *Lig. fibulocalcaneare* dagegen insbesondere bei Dorsalextension (Neumann 2012, Colville et al. 1990).

Üblicherweise reißt zunächst das *Lig. fibulotalare anterius*, danach und am zweithäufigsten das *Lig. fibulocalcaneare* (Yildiz and Yalcin 2013, Böttner 2010). Das *Lig. fibulotalare anterius* wird als schwächstes der Seitenbänder angesehen (Sauer et al. 1978, van den Bekerom et al. 2008).

Eine Durchtrennung des *Lig. fibulotalare anterius* ermöglicht bei Spitzfußstellung ein Aufklappen im oberen Sprunggelenk von durchschnittlich 10° (Wirth et al. 1984), es erhöhen sich die Innenrotations- und Inversionsmöglichkeit mit anterolateraler Dislokation des Talus und die posteriore Subluxation der Fibula (Neumann 2012).

Supinations-Adduktions- oder Inversions- und Innenrotationsverletzungen führen in Plantarflexions-Bewegung zu einer Ruptur des *Lig. fibulotalare anterius*, in Dorsalflexion zu einer Ruptur des *Lig. fibulocalcaneare* (Funk 2011, Colville et al. 1990).

Die Verletzungen des anterioren und fibulocalcanearen Seitenbandes betreffen 20% der Verletzungen des Seitenbandkomplexes (van den Bekerom et al. 2008). In der klinischen Untersuchung kann sich eine laterale Aufklappbarkeit oder ein Talusvorschub bemerkbar machen.

Eine isolierte Durchtrennung des *Lig. fibulocalcaneare* hat eine Aufklappbarkeit des oberen Sprunggelenkes bei Rechtwinkelstellung des Fußes von 10° und Stabilität bei Spitzfußstellung in a.p. Ebene zur Folge (Wirth et al. 1984). Isolierte Verletzungen des *Lig. fibulocalcaneare* scheinen nur in extremer Dorsalflexion mit Supinationstrauma möglich (Seiler 1999), wobei es sich um seltene Verletzungen handelt (Brostrom 1966, van den Bekerom et al. 2008).

Die kombinierte Durchtrennung der Ligg. fibulotalare anterius und fibulocalcanearae führt zu einer seitlichen Instabilität in Spitzwinkel- bis Rechtwinkelstellung des Fußes von 15 bis 30° sowie zu einer Rotationsschublade des Talus, also einer anterolateralen Instabilität des Sprunggelenkes (Seiler 1999) und einer subtalaren Instabilität (Ringleb et al. 2011).

Das Lig. fibulotalare posterius ist in Dorsalflexion und Außenrotation gespannt, bei Plantarflexion entspannt (Colville et al. 1990).

Das Lig. fibulotalare posterius reißt für gewöhnlich nicht, erst bei großer Gewalt im Rahmen einer vollständigen Fußluxation (van den Bekerom et al. 2008).

Bei Durchtrennung des gesamten fibularen Seitenbandapparates entsteht eine a.p. Subluxationsmöglichkeit des Talus (Wirth et al. 1984).

Zusammenfassend sind die osteocartilaginären Strukturen mit der fibulotalaren Gelenkfläche die Primärstabilisatoren am oberen Sprunggelenk. Die Kollateralbänder sind Sekundärstabilisatoren, sie dominieren am unbelasteten Gelenk (Seiler 1999).

Die Verletzungsmorphologie ist abhängig von der Fußstellung im Moment der Kräfteinwirkung sowie der Richtung des Kraftvektors. Aufgrund der hohen Formschlüssigkeit des Gelenkkomplexes und der straffen ligamentären Führung entstehen in vielen Fällen typische Kombinationsverletzungen der knöchernen ligamentären Strukturen sowie des Gelenkknorpels (von Recum et al. 2006).

2.4. Histoanatomie

Bänder sind zusammen mit Knorpel und Knochen Teil des Binde- und Stützgewebes.

		Ligament	Sehne
Fawcett, Zschäbitz	straff, parallelfaseriges Bindegewebe	↑↑	↑↑↑
	Zellgröße	↓	↓↓↓
	Zellanzahl	↓	↓↓↓
	DNA Menge	↓	↓↓↓
	Struktur	klar, fibrös, weiß	klar, fibrös, weiß
	Faserbündelanordnung	multidirektional	streng parallel, unidirektional
	Elastin	↑↑	↑
	Zelluläre Bestandteile	Fibrozyten, Faserknorpelzellen	Flügelzellen, Faserknorpelzellen
	Kollagen Typ I	↑↑	↑↑↑
Ge	Steifheit	2-40 N/mm ²	500-150 N/mm ²
	Stress bis zur Ruptur	2-14 N/mm ²	35-50 N/mm ²
	Kollagenfaser Kräuselung	↑	↓
	Collagen Crosslinkings DHLNL/HLNL/DHLNL	↑	↓
	GAGs	↑	↓
	Myofibroblasten (SMA positiv)	↑	↓
	Fibrillen Durchmesser	klein, medium	medium, groß
Mohr	Kollagen Typ III	↑	↓

Tabelle 2: Histologischer Vergleich von Ligamenten und Sehnen (Mohr 1987, Ge 2018, Zschäbitz 2005, Fawcett 1986)

Der Aufbau der Bänder ähnelt dem von Sehnen mit entscheidenden Unterschieden (Tab. 2). Sie verbinden Knochen mit Knochen, während Sehnen Muskeln mit Knochen verbinden (Mohr 1987).

Hauptbestandteil der Bänder sind Fasern. Diese sind hierarchisch nach Größe klassifiziert. Die kollagenen Faserbündel sind die größte sichtbare Struktur, gefolgt von den kollagenen Fasern, den kollagenen Fibrillen und zuletzt den Tropokollagenmolekülen.

Die durchschnittliche Länge unverzweigter kollagener Fasern rangiert zwischen 1 und 10 μm abhängig vom Spannungszustand. Bei vermehrter Spannung werden sie länger, bei reduzierter Spannung kürzer (Schiebler and Korf 2007) mit einem Durchmesser von 1 bis 30 μm (Zschäbitz 2005).

Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Sehnen-Kollagenfibrillen ergaben Durchmesser von 10 bis 300 nm (Zschäbitz 2005) und 30 bis 520 nm (Schiebler and Korf 2007), diese sind altersabhängig (Schiebler and Korf 2007).

Ein Kollagen I Molekül ist 300 nm lang und hat einen Durchmesser von 1,5 nm (Zschäbitz 2005).

Kollagenfibrillen sind unter einem niederenergetischen Elektronenmikroskop eindeutig erkennbar und Kollagenfasern als Fibrillenbündel unter dem Lichtmikroskop zu sehen (Benjamin and Ralphs 1998).

Die Kollagenfasern lassen sich mit Eosin rot, Anilin blau (Azan Färbung) und Lichtgrün (Trichrom Färbung nach Masson Goldner) anfärben.

Im Transmissionsemissions Elektronenmikroskop (TEM) zeichnen sich Kollagenfibrillen durch eine dunkle und helle Querstreifung aus mit einer Periodizität von durchschnittlich 64 nm (Schiebler and Korf 2007).

Die darin enthaltenen Zellen sind überwiegend Fibrozyten. Diese sind meist flach, in der Seitenansicht spindelförmig, mit langen membranartig ausgezogenen, äußerst dünnen Enden. Sie besitzen einen abgeplatteten Zellkern, der im Profil spindelförmig und in der Aufsicht ellipsoid erscheint. Im Zytoplasma sieht man wenig raues endoplasmatisches Retikulum, wenig Mitochondrien und einen kleinen Golgi-Apparat. Die Zellen passen ihre Form den Zwischenräumen der Faserbündel an (Fawcett 1986).

Fibroblasten sind ebenfalls spindelförmig und plump mit größeren Fortsätzen. Sie besitzen eine hohe Syntheseleistung und daher einen umfangreicheren und auffälligen Golgi-Apparat. Sie bilden Interzellulärsubstanzen, vorwiegend kollagene Fasern vom Typ I und Grundsubstanzen (Schiebler and Korf 2007).

Diese Zellen sind zwischen den Kollagenfaserbündeln mit Toluidinblau in dunkelblau, mit Kossa und Goldner Färbung in braun erkennbar.

Bänder besitzen am Knochenansatz eine 4 Zonenstrukturierung aus fibrösem Gewebe, nicht mineralisiertem und mineralisiertem Faserknorpel und lamellärem Knochen (Mohr 1987).

Der aufgezeigte Wissensstand verdeutlicht, dass es bisher keine Erkenntnisse darüber gibt, ob die unterschiedlichen Verletzungsmuster an Bändern am oberen Sprunggelenk auf strukturellen Unterschieden oder allein aufgrund der topographischen Lage beruhen, und damit durch die Reihenfolge in einer Gelenkkette im Rahmen des Verletzungsmechanismus zu erklären sind. Auch über die Zonenstrukturierung der Bandansätze des oberen Sprunggelenkes liegen keine Daten vor.

3. Material und Methoden

Im Institut für Rechtsmedizin (UKE) wurden vier Sprunggelenke von vier verstorbenen Patienten (Tab. 3) präpariert und fotodokumentiert. Die Bänder wurden mit Knochenansätzen als Lig. S1 bis 4 bzw. F1 bis 4 definiert (Tab. 4). Die Entnahme wurde im Rahmen der rechtsmedizinischen Sektion gemäß des Hamburger Sektionsgesetzes durchgeführt. Das Einverständnis der Patienten oder der Angehörigen lag vor.

Es folgte unmittelbar die Fixierung der entnommenen Bänder in Formaldehyd mit systematischer Beschriftung. S steht für Syndesmose, F für fibularen Seitenbandkomplex. Die erste Ziffer bezeichnet den Patienten, die zweite das Band.

Die Sprunggelenksbänder wurden bis zur weiteren Bearbeitung bei Raumtemperatur in Formaldehyd eingelegt und zunächst im Institut für Rechtsmedizin aufbewahrt.

Im Institut für Osteologie und Biomechanik (UKE) wurden im Folgenden mit einer Diamantsäge die Bänder im Längsverlauf in drei Teile geteilt, fibularseitig erhielt der knöcherne Ansatz eine kleine Kerbe zur Markierung des Knochens. Die Proben wurden anschließend zur weiteren Verarbeitung in Einbettkassetten mit unten genannter Systematik (Tab. 4) gelegt und für das Lichtmikroskop sowie das Rasterelektronenmikroskop zugeordnet und beschriftet.

Patient 1	79 Jahre, männlich
Patient 2	42 Jahre, weiblich
Patient 3	68 Jahre, männlich
Patient 4	81 Jahre, weiblich

Tabelle 3: Vier verstorbene Patienten zur Sprunggelenksbandentnahme.

Syndesmosenbänder	
S1.1	Vordere Syndesmose LTFA
S1.2	Lig. interosseum LTFI
S1.3	Hintere Syndesmose LTFP
Fibulare Seitenbänder	
F1.1	Lig. fibulotalare anterius LFTA
F1.2	Lig. fibulocalcaneare LFC
F1.3	Lig. fibulotalare posterius LFTP

Tabelle 4: Systematische Beschriftung der Sprunggelenksbänder.

3.1. Präparation des Syndesmosenkomplexes

Zur präparatorischen Darstellung der vorderen Syndesmose und des Lig. interosseums erfolgte die Lagerung des Patienten in Rückenlage. Nach einem bogenförmigen Hautschnitt dorsal der Fibula bis an den lateralen Fußrand wurde die subkutane Fettschicht mit der darunterliegenden Unterschenkelfaszie dargestellt und entlang des vorgegebenen Hautschnittes durchtrennt.

Anschließend folgte die Durchtrennung der Retinacula extensorum superius und inferius. Die Mm. extensores hallucis longus und digitorum longus sowie der M. tibialis anterior wurden nach medial gehalten. Proximal wurde die vordere Syndesmose und distal das Lig. fibulotalare anterius sichtbar (Abb. 3(a)). Nach Durchtrennung des Retinaculum peroneum superius konnten die Mm. peronei longus und brevis nach lateral gehalten werden. Damit wurde das Lig. fibulocalcaneare sichtbar (Abb. 3(b)).

Der tibiale und fibuläre Teil der vorderen Syndesmose wurde vorsichtig knochenah am Ansatz mit einem Skalpell abgesetzt (Abb. 3(c)). Zur Markierung wurden Fäden in das Band genäht, fibulärseitig kurz, tibialseitig lang.

Nach Entfernung der vorderen Syndesmose und des Lig. fibulotalare anterius zeigte sich zwischen Fibula und Tibia aufgespannt der interossäre Teil des Syndesmosenkomplexes, das Lig. interosseum. Die Fibula wurde ca. 15 cm proximal von der Fibulaspitze mit einer oszillierenden Knochensäge osteotomiert (Abb. 3(c)).

Das Lig. interosseum wurde in seiner Vollständigkeit identifiziert, entnommen und fadenmarkiert. Nach Entfernung des Lig. interosseums wurde die hintere Syndesmose sichtbar.

Im nächsten Schritt wurde diese entnommen und mittels Fadenmarkierung gekennzeichnet. Alle Einzelschritte wurden fotodokumentiert. Bei der ersten lichtmikroskopischen Untersuchung fiel in Serie 1 ein Informationsverlust an den Bandenden durch die Entfernung mit dem Skalpell und die Fadenmarkierung auf. Daher wurde das Verfahren für die Serien 2 bis 4 geändert.

Die Bandansätze wurden nun mit einem Meißel osteotomiert und jedes Band mit seinen ossären Bandansätzen herauspräpariert. Der fibuläre knöcherne Ansatz wurde mit einer kleinen Kerbe versehen.

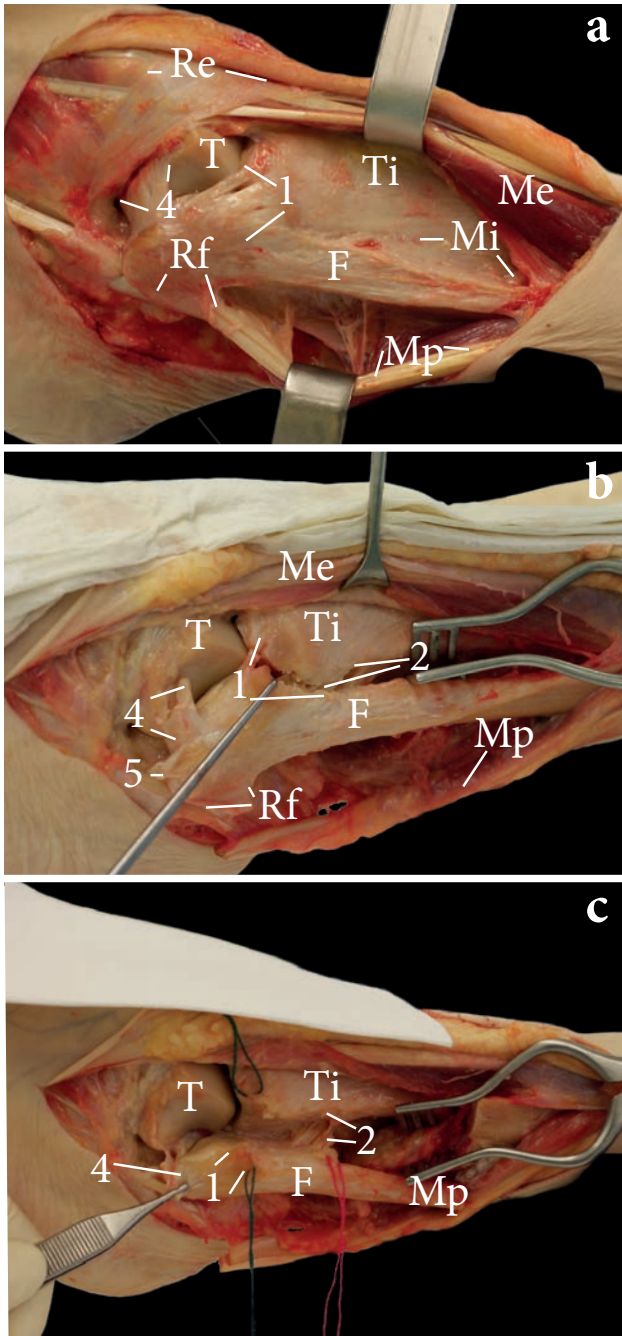


Abbildung 3: (a) Nach Entfernung der Unterschenkelfaszie und Beiseitehalten der Muskulatur: vordere Syndesmose 1, Lig. fibulotalare anterius 4, Fibula F, Talus T, Tibia Ti, Mm. peronei longus und brevis Mp, Extensor digitorum longus Me, Retinaculum flexorum superius Rf, Retinaculum extensorum Re, Membrana interossea M. (b) Nach Durchtrennung der Lig. fibulotalare anterius und der vorderen Syndesmose: Talus T, Tibia Ti, Fibula F, vordere Syndesmose 1, Lig. interosseum 2, Lig. fibulotalare anterius 4, M. Extensor digitorum longus Me, Mm. peronei longus und brevis Mp, Lig. fibulocalcaneare 5, Retinaculum flexorum Rf. (c) Nach Fibulaostektomie und Mobilisierung zur Seite: Fibula F, Talus T, Tibia Ti, vordere Syndesmose 1, Lig. interosseum 2, Mm. peronei longus und brevis Mp, Lig. fibulotalare anterius.

Für die Fotodokumentation der hinteren Syndesmose wurde in Bauchlage über einen dorsalen Schnitt auf der Fibula präpariert.

Nach Entfernung des subkutanen Bindegewebes wurden die dorsalen Muskelgruppen mit dem M. flexor hallucis longus, dem Trizeps surae und lateral den Mm. peronei longus et brevis sichtbar. Letztere wurden nach medial gehalten, um die hintere Syndesmose darzustellen (Abb. 5(a)). Das Lig. fibulotalare posterius war unter reichlich Fettgewebe verborgen, dieses wurde entfernt und das Band wie zuvor beschrieben (Abb. 5(a)) entnommen. Die Kerbe war im Verlauf in den Schnittbildpräparaten nicht mehr sichtbar, da sie nicht erfasst wurde.

3.2. Präparation des lateralen Seitenbandkomplexes

Über den zuvor genannten lateralen Zugang mit Tiefenpräparation bis auf die Fibula spannte sich der Seitenbandkomplex sternförmig zum Talus bzw. Calcaneus auf (Abb. 3 und 4). Es wurde sukzessive zunächst der talare Ansatz und anschließend der fibuläre Ursprung des Lig. fibulotalare anterius mit dem Skalpell abgetrennt. Die Ansätze wurden fadenmarkiert, lang für den Ansatz, kurz für den Ursprung. Auf gleiche Weise wurde mit dem Lig. fibulocalcaneare und zuletzt mit dem Lig. fibulotalare posterius verfahren (Abb. 3 und 4). Bestehende interligamentäre Faserverbindungen zwischen den Ligg. fibulotalare anterius, fibulocalcaneare und fibulotalare posterius mussten scharf durchtrennt werden.

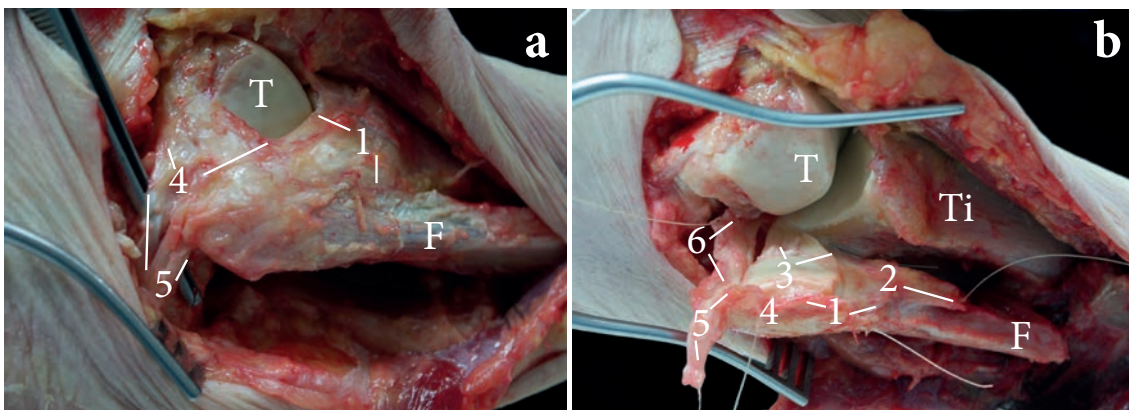
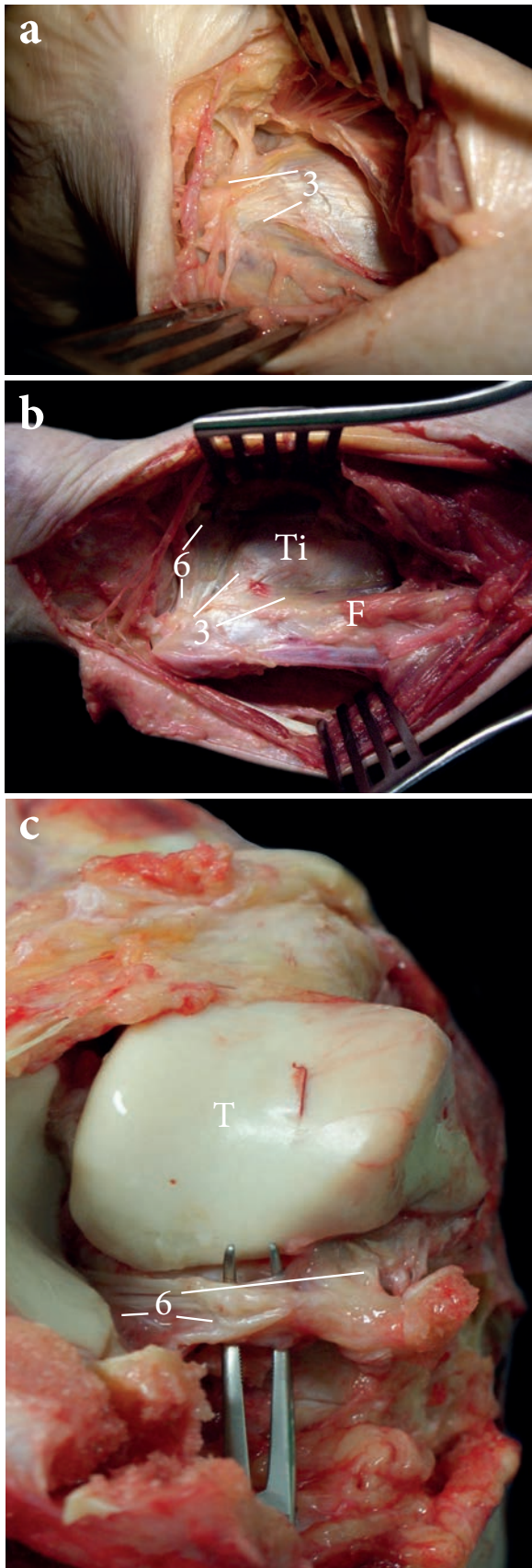


Abbildung 4: (a) (b) Nach Entfernung der Unterschenkelfaszie und Beiseitehalten der Muskulatur: Syndesmosse 1, Lig. fibulotalare anterius 4, Lig. fibulocalcaneare 5, Fibula F, Talus T, Mm. peronei longus und brevis Mp, M. extensor digitorum longus Me. (b) Vollständige Mobilisierung der Fibula: vordere Syndesmosse 1, Lig. interosseum 2, hintere Syndesmosse 3, Lig. fibulotalare anterius 4, Lig. fibulocalcaneare 5, Lig. fibulotalare posterius 6, Fibula F, Talus T, Tibia Ti.

Wie bereits bei der Präparation des Syndesmosenkomplexes wurde das Vorgehen für die weiteren Serien geändert: Die Bandansätze wurden mit dem Meißel osteotomiert und mit einem ossären Bandansatz herauspräpariert. Die fibuläre Seite wurde mit einer kleinen Kerbe versehen. Es erfolgte stets die Fotodokumentation der Einzelschritte.

Für die Präparation des Lig. fibulotalare posterius wurde ein dorsaler Zugang in Bauchlage gewählt in oben genanntem Vorgehen. Nach Entfernung der hinteren Syndesmosse war die vollständige Darstellung des lateralen Bandansatzes möglich. Zur Darstellung des medialen Anteiles musste der Fuß fast vollständig luxiert werden, da das Band weit nach medial reicht. Verbindungsfasern zur hinteren Syndesmosse mussten scharf durchtrennt werden. Anschließend konnte das Lig. fibulotalare posterius im o.g. Verfahren entfernt werden (Abb. 4 und 5). Die Kerbe war im Verlauf in den Schnittbildpräparaten nicht mehr sichtbar, da sie nicht erfasst wurde.



3.3. Aufarbeitung zur Lichtmikroskopie

Die aus den Sprunggelenken entnommenen Bänder wurden zunächst mit 3,7%igem PBS-gepuffertem Formaldehyd für 48 Stunden fixiert und danach in einer aufsteigenden Ethanolreihe für jeweils 12 Stunden in 70%igem, 80%igem, 90%igem, 96%igem und schließlich in 100%igem Ethanol entwässert. Anschließend wurden die Gewebeproben nach Infiltration in Methylmetacrylat (Merck, Darmstadt, Deutschland) unentkalkt in ein LPG-BPO-Methylmetacrylat Gemisch (Merck, Darmstadt, Deutschland) eingebettet.

Nach 24-stündiger Aushärtung bei einer Temperatur von 4° C wurde der daraus entstandene Block zunächst angeschliffen und danach 4 µm dicke Schnitte an einem Rotationsmikrotom (Cut 4060E, MicroTech, München, Deutschland) angefertigt.

Die auf einem Objektträger fixierten Schnitte wurden in der Folge nach Standardprozedur mit Toluidinblau, Masson-Goldner und von Kossa angefärbt.

Abbildung 5: (a) (b) (c) dorsale Ansicht: hintere Syndesmose 3 mit nahtlosem Übergang ins Periost, Lig. fibulotalare posterius 6, Fibula F, Tibia Ti, Talus T.

3.4. Aufarbeitung zur Rasterelektronenmikroskopie

Zur rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung wurden die dafür zugeteilten Bänder aus dem Formaldehyd entnommen. Es wurden vorsichtig mittig einzelne Bündel in Längsrichtung abgezogen und dadurch aufgeraut, um eine dreidimensionale Oberfläche der Bandbestandteile zu erhalten. Anschließend wurden diese in Ethanol überführt. Für die Untersuchung im REM wurden die Proben einer kritischen Punkt-Trocknung unterzogen (CPD 030, Bal-Tec AG, Balzers, Liechtenstein) und anschließend mit Gold bespattert (CED 030, Bal-Tec AG, Balzers, Liechtenstein).

3.5. Untersuchung, Vergleich und Quantifizierung

3.5.1. Lichtmikroskopie

Verwendet wurde ein Lichtmikroskop der Firma Zeiss, Axioplan 2, phot 2 mit angeschlossener Kamera, AxioCam ERc5s (Zeiss, Oberkochen, Deutschland).

Alle Bänder wurden in den Vergrößerungen 50X und 400X untersucht und fotodokumentiert. Die Bänder wurden in drei Anteile klassifiziert: nahe des fibularen Knochenansatzes, nahe des tibialen Knochenansatzes sowie die Bandmitte. Wir bezeichneten die Bänder nahe des Knochenansatzes in Anlehnung an Benjamin et al. als Enthesis I und Enthesis II (Benjamin et al. 2006).

Verglichen wurde die Wellung der Kollagenfasern, die Anordnung derselben innerhalb des Bandabschnittes (kompakt/locker, längs/quer), Anzahl der Zellkerne, Anzahl der Gefäßgruppen und die Darstellung der Zellarten (Toluidinblau).

Die Zellkerne wurden mit Hilfe eines Maß-Gitters (1x1 mm) in zwei Stichproben je Bandabschnitt (Enthesis I, Bandmitte, Enthesis II) bei 400X gezählt und graphisch dargestellt.

Auf eine statistische Untersuchung wurde bei fehlender Repräsentativität und zu kleiner Stichprobengröße verzichtet, da kein signifikantes Ergebnis zu erwarten war.

Das Verhältnis von Kollagenfasern und Zytoplasma wurde innerhalb der Bandabschnitte und mit den anderen Bändern verglichen (Masson-Goldner Färbung, grün-rot).

Weiter wurden Polarisationslichtmikroskopische Bilder zur Untersuchung des Übergangs der Kollagenfasern in die osteoligamentären Übergänge (Bandansätze) sowie der Kollagenwellung im Bandverlauf erstellt und beschrieben (160X).

3.5.2. Rasterelektronenmikroskopie

Die Präparate durchliefen nacheinander das REM (LEO 435 VP, LEO Electron Microscopy Ltd., Cambridge, England) in den Vergrößerungen 30X zur Übersicht und 1000X zur Detailansicht.

Verglichen wurden die Wellung und Dicke der Kollagenfaserbündel, die Dicke der Faserbündel, der osteoligamentäre Übergang und die Textur der Bandoberfläche.

3.5.3. Spektralanalyse

Hierbei wurde das Spektrum der vorderen Syndesmose als Band, das nach klinischer Erfahrung relativ häufig reißt, und mit dem Spektrum des Lig. fibulotalare posterius als Band, das nach klinischer Erfahrung relativ selten reißt, verglichen. Die Bänder stammten vom gleichen Patienten (Tab. 3, Pat. 4). Hierbei wurden die Bandproben bis zur kritischen Punkt-Trocknung wie bei den Bandproben für die REM Untersuchung vorbereitet. Anschließend wurde ein ca. 0,5 cm langes Bandstück entnommen und unter dem Fourier-Transformations-Infrarotspektroskop (PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA) unter Nutzung des UATR Kristalls (Universal attenuated total reflectance) untersucht.

Mit Hilfe einer speziellen Software (PerkinElmer Spectrum Version 10.03.09) wurden Wellenlängen gemessen und mit bekannten Messdaten verschiedener Geweben verglichen (Belbachir et al. 2009). Ausschlaggebend für eine charakteristische Wellenlänge ist der Gehalt an verschiedenen Kollagensubtypen.

4. Ergebnisse

4.1. Anatomische Präparation und Fotodokumentation

Der Syndesmosenkomplex mit vorderer, hinterer Syndesmose sowie dem Lig. interosseum und der Seitenbandkomplex mit den Ligg. fibulotalare anterius, fibulocalcaneare und fibulotalare posterius wurden mit einem gezielten Zugang lateral am oberen Sprunggelenk dargestellt (Abb. 3-5).

Die *vordere Syndesmose* war im Vergleich zu den anderen Bändern eher dünn und kurz. Sie ging fließend ins Periost über, so dass eine klare Grenze zur Abtrennung mittels Skalpell erschwert war.

Bei der Darstellung der *Membrana interossea* fiel auf, dass diese papierdünn war und stumpf digital präpariert werden konnte (Abb. 3(b)). Das *Lig. interosseum* war stets kräftig ausgebildet und eindeutig von der Membrana interossea abzugrenzen. Seine Kräftigkeit und das Bandvolumen waren nicht geringer als das der anderen Bänder. Es ließ sich nur scharf abpräparieren (Abb. 3(c)).

Das Lig. transversum stellte sich in unterschiedlicher Ausprägung als Abspaltung der *hinteren Syndesmose* in coronarer Ebene mit einem gemeinsamen Ursprung dar. Analog zu einem zweigeteilten Aufbau des Lig. fibulotalare anterius und der vorderen Syndesmose in axialer Ebene verlief kaudal parallel zur hinteren Syndesmose ein besonders kräftiger knorpelig ausgeprägter Bandzügel (Abb. 3-4).

Das *Lig. fibulotalare anterius* war meistens zweibündig und eher dünn. Sein Ansatz war von demjenigen der anderen Seitenbänder, insbesondere des *Lig. fibulocalcaneare* kaum zu trennen und ging in diesen über (Abb. 3-4). Das *Lig. fibulotalare posterius* fiel durch seine kräftige kordelartige Form auf. Es war so voluminös, dass es zur histologischen Untersuchung aufgeteilt werden musste. Insbesondere bei der initialen Präparation in Rückenlage war dieses Band nicht zugänglich. Erst in Bauchlage konnte der mediale Anteil erreicht werden. Am Ansatz war das Band mit der hinteren Syndesmose durch Faserbündeln verbunden (Abb. 4-5).

4.2. Lichtmikroskopische Auswertung und Bilddokumentation

4.2.1. Qualitative Auswertung

Bänder	EI	EII	Mitte	Verlauf	Aufbau	Zytoplasma	Kollagen	E Zone
Vordere Syndesmore								
S1.1	FKZ reich	FZ arm	FZ reich	quer E, längs Mitte	kompakt	reich	arm	EI UF, CF, TM, B EII CF
S2.1	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs	teils locker, teils kompakt	halb	halb	EI/II UF, CF, TM, B
S3.1	FKZ reich	FKZ reich	FZ arm	längs E, quer Mitte	locker	halb	halb	EI/II UF, CF, TM, B
S4.1	FKZ arm	FKZ reich	FZ reich	längs E, quer Mitte	kompakt	EII	EI, Mitte	EI UF, CF, TM, B EII UF
Lig. Interosseum								
S1.2	FZ arm	FKZ reich	FZ arm	EI/Mitte längs, EII quer	kompakt	reich	arm	EII UF
S2.2	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	EI/II längs, Mitte quer	locker	reich	arm	EI/II UF, CF, TM, B
S3.2	FKZ reich	FKZ reich	FZ arm	längs	kompakt	reich	arm	EI/II UF, CF, TM, B
S4.2	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	teils längs, teils quer	kompakt, Mitte locker	reich	arm	EI/II UF, CF, TM, B
Hintere Syndesmore								
S1.3	FKZ arm	FKZ arm	FZ reich	längs	kompakt	arm	reich	EI UF
S2.3	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs	kompakt	reich	arm	EI UF, CF, TM, B EII UF, TM
S3.3	FKZ arm	FKZ arm	FZ reich	längs und quer	locker, teils kompakt	reich EII	arm EI, Mitte	EI/II UF, CF, TM, B
S4.3	FKZ reich	FKZ arm	FZ arm	quer	kompakt	arm	reich	EI UF, TM, B EII UF
Lig. fibulotalare anterius								
F1.1	FZ reich	FZ reich	FZ reich	längs	kompakt	reich	arm	EI UF
F2.1	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	gemischt längs, quer	locker	arm	reich	EI/EII UF, CF, TM, B
F3.1	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	quer	kompakt	reich	arm	EI UF, CF, TM, B EII UF
F4.1	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	quer	kompakt E1, Mitte locker	arm	reich	EI/II UF, CF, TM, B
Lig. fibulocalcaneare								
F1.2	FZ reich	FZ reich	FZ reich	längs, teils quer	locker	gemischt	gemischt	EII UF
F2.2	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs, teils quer	kompakt	reich	arm	EI UF, TM EII UF, CF, TM, B
F3.2	FKZ arm	FKZ reich	FZ reich	längs, teils quer	kompakt	reich	arm	EI UF EII UF, CF, TM, B
F4.2	FKZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs	kompakt	reich	arm	EI/II UF, CF, TM, B
Lig. fibulotalare posterius								
F1.3	FZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs, wenig quer	kompakt	reich	arm	EI/II UF
F2.3	FZ reich	FKZ reich	FZ reich	längs, teils quer	kompakt	reich	arm	EI UF EII UF, CF, TM, B
F3.3	FKZ arm	FKZ arm	FZ reich	quer	kompakt	reich	arm	EI/II UF, CF, TM, B
F4.3	FZ arm	FKZ arm	FZ arm	längs	teils locker, teils kompakt	arm	reich	EI UF, TM EII UF, CF, TM, B

Tabelle 5: Lichtmikroskopische Untersuchung zur Morphologie des Seitenband- und Syndesmosenkomplexes.

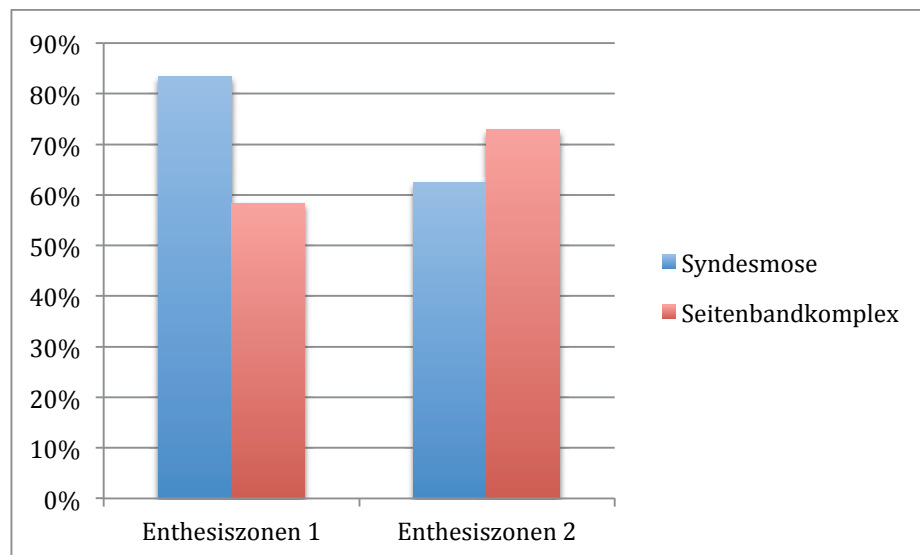


Diagramm 1: Anteil der Enthesiszonen.

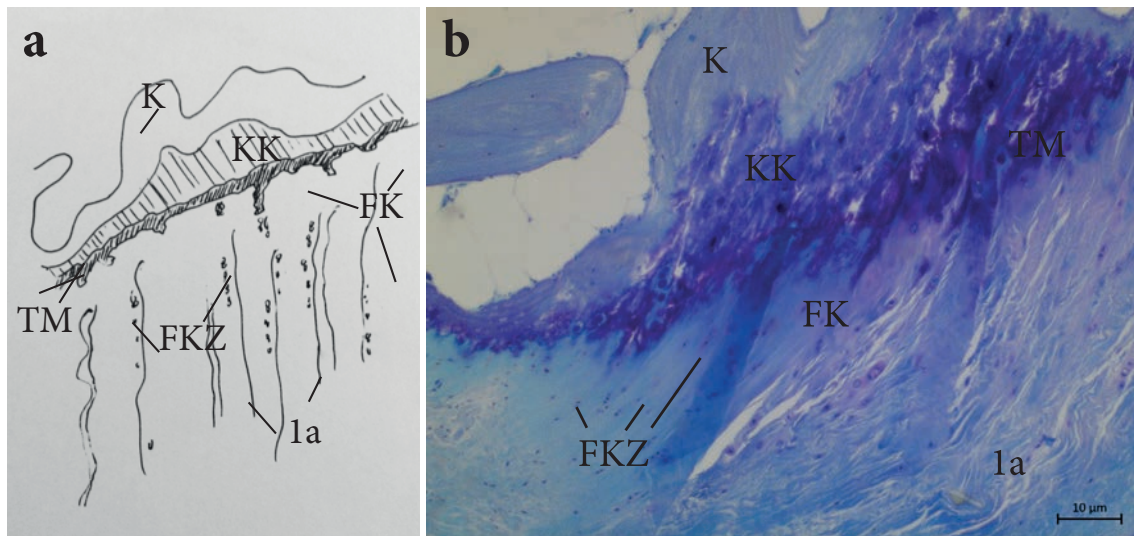


Abbildung 6: Lig. fibulotalare anterius F3.1 Enthesis Zonen. (a) Zeichnung (MB 2017) (b) Knochen K, kalzifizierter Faserknorpel KK, Tidemark TM, Faserknorpel FK, Faserknorpelzelle FKZ, 1a Faserbündel längs (Toluidin blau 50X).

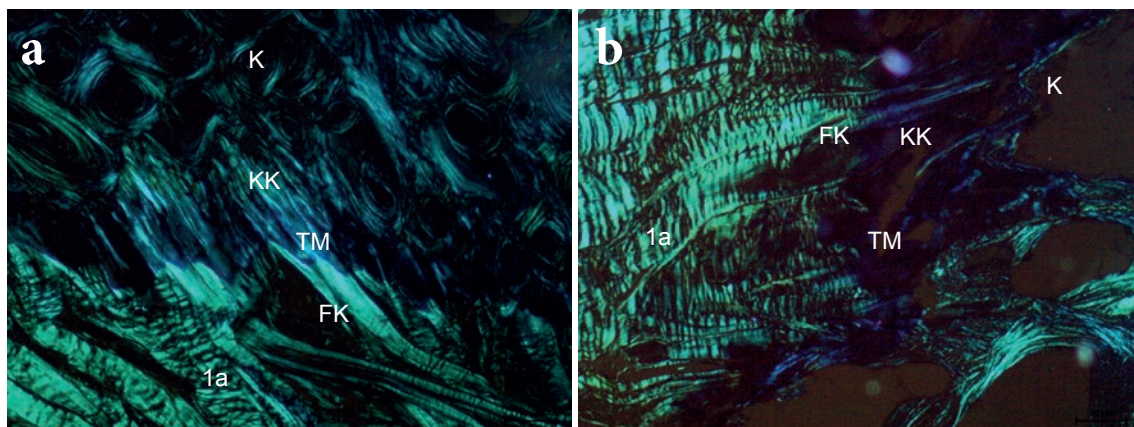


Abbildung 7: Vordere Syndesmose (a) S3.1 und (b) S4.1 in Enthesis 1, Faserverlauf bis in den Knochen. Enthesis Zonen (a) und (b) Knochen K, kalzifizierter Faserknorpel KK, Tidemark TM, Faserbündel längs, gewellt 1a (Polarisationslicht Toluidinblau, 160X).

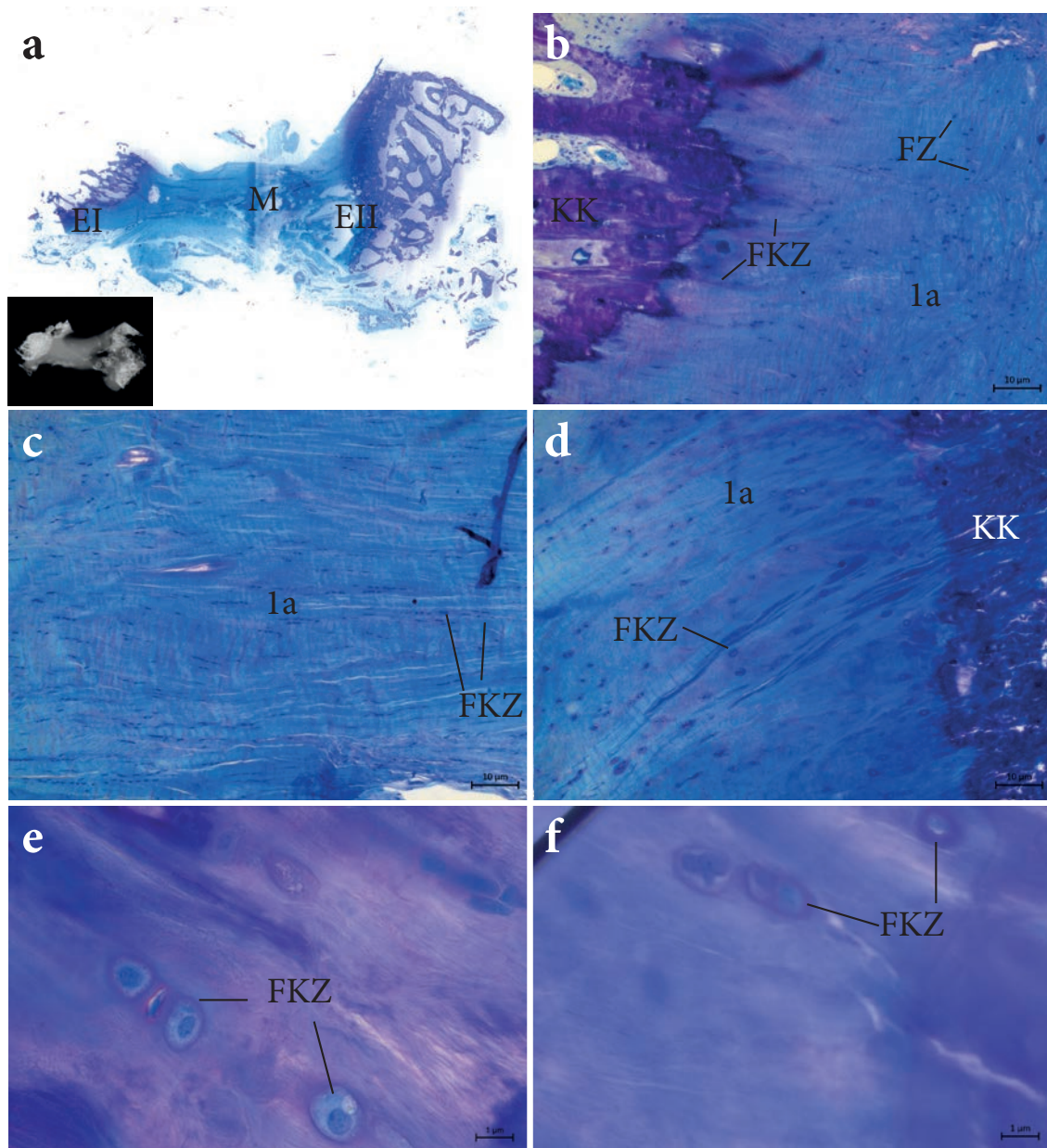


Abbildung 8: (a) Übersicht Lig. fibulotalare posterius S2.3, Enthesis I EI, Enthesis II EII, Mitte M. (b) Enthesis I kompakt, zellreich mit Faserknorpelzellen FKZ und Fibrozyten FZ. (c) Mitte kapillarisiert, zellreich mit Fibrozyten FZ, Faserbündel längs angeschnitten 1a. (d) Enthesis II kompakt, zellreich mit Faserknorpelzellen FKZ. Kollagenfaser längs angeschnitten 1a, Knochen K (Scan 2100dpi, Toluidin Blau, 50X). (e) Enthesis I, Faserknorpelzelle FKZ. (f) Enthesis II, Faserknorpelzelle FKZ (Toluidinblau 400X).

4.2.2. Quantitative Auswertung

Nach Auszählung der Gefäßgruppen und Zellkerne unter einem Mikroskop mit Rastergitter (1 mm) wurden die Ergebnisse tabellarisch dokumentiert und graphisch ausgewertet.

Bei der graphischen Auswertung der Anzahl an Gefäßgruppen fällt auf, dass die vordere Syndesmose über eine geringere Vaskularisierung verfügt als alle anderen untersuchten Bänder.

Das Lig. fibulotalare anterius zeigt die beste Vaskularisierung aller untersuchten Bänder. Das Lig. interosseum ist besonders reich an Gefäßen innerhalb der Syndesmobänder (Diagr. 3).

Bei der graphischen Auswertung der Zellstichproben fällt auf, dass Patient 2 in allen Bändern besonders viele Zellen besitzt.

In 17 von 24 Bändern ist die höchste Zellzahl in einer Enthese zu beobachten. Bei 7 der Bänder ist die höchste Zellzahl in der Bandmitte zu finden (Diagr. 2).

Anhand der graphischen Auswertung lässt sich kein Trend bezüglich der Lokalisation der höchsten Zellzahl innerhalb eines Bandes erkennen (Diagr. 2).

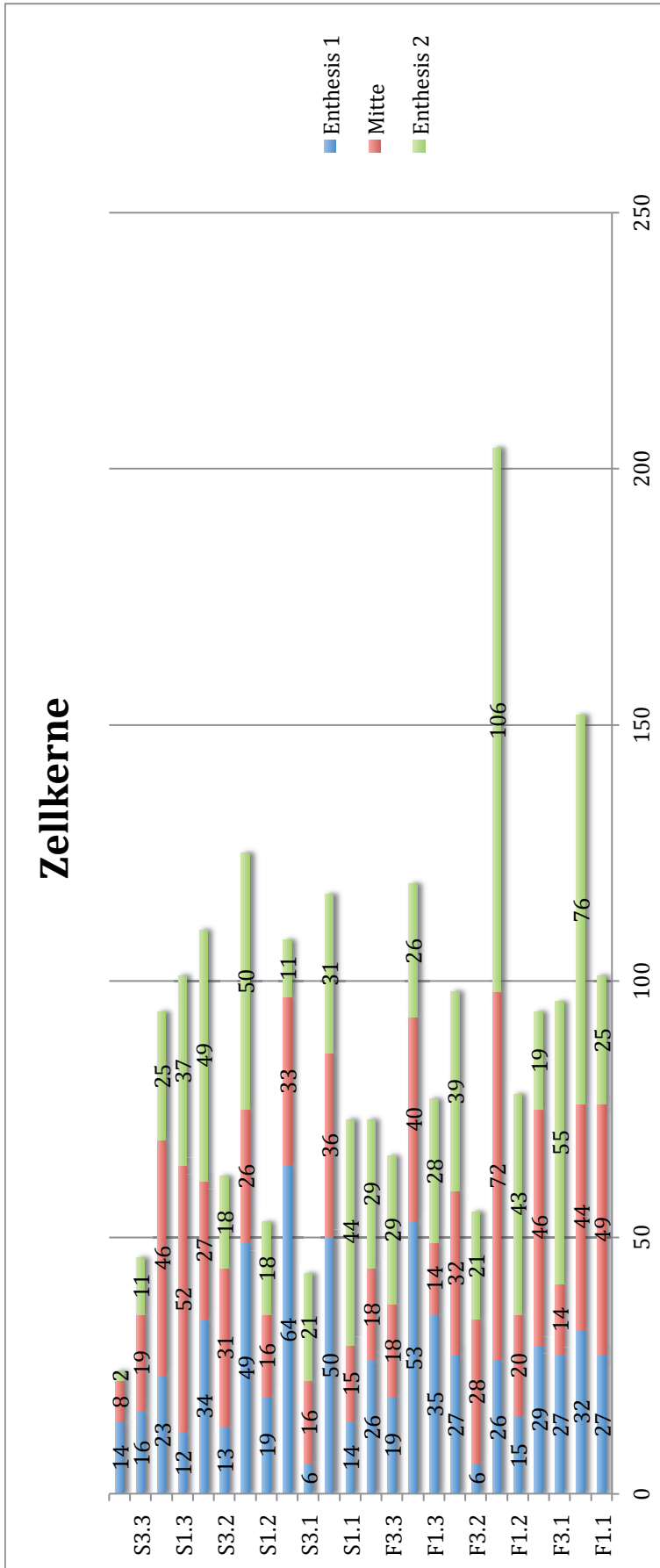


Diagramm 2: Anzahl der Zellkerne in Ei, M und EII.

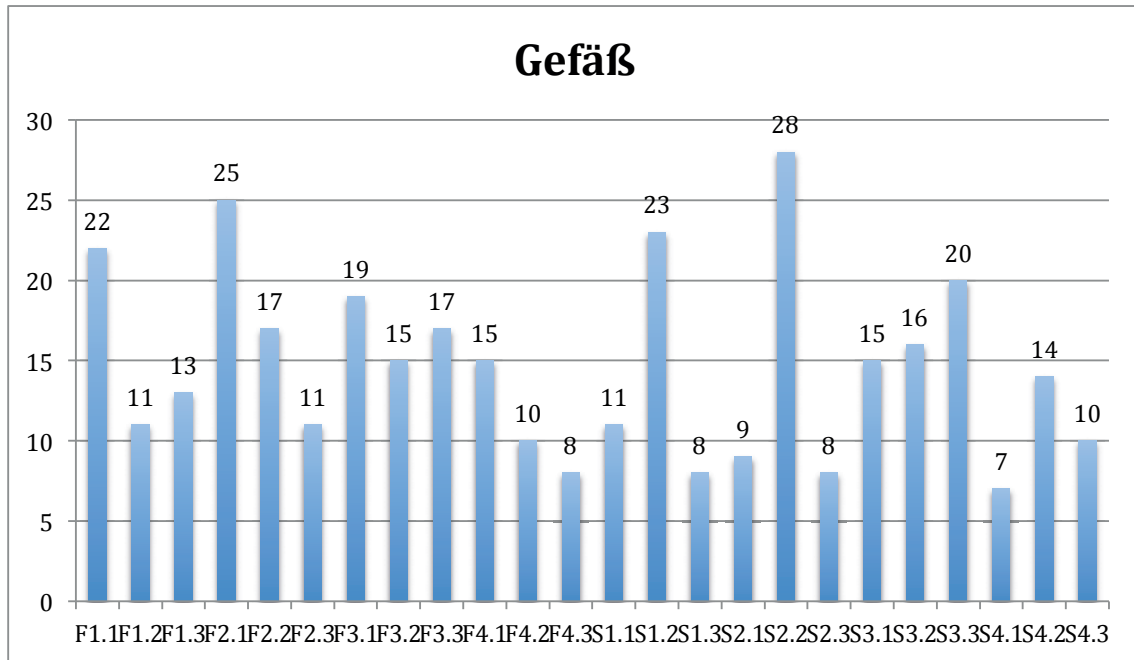


Diagramm 3: Anzahl der Gefäßgruppen in einem Band.

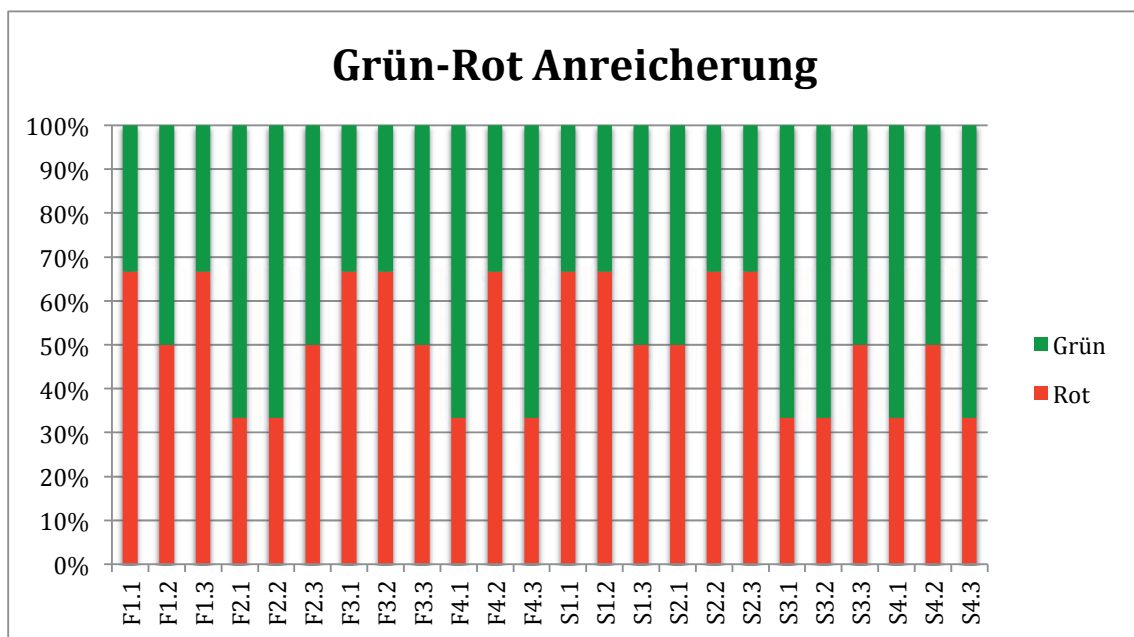


Diagramm 4: Anteil der rot-grün Anreicherung eines Bandes in der Masson Goldner Färbung.

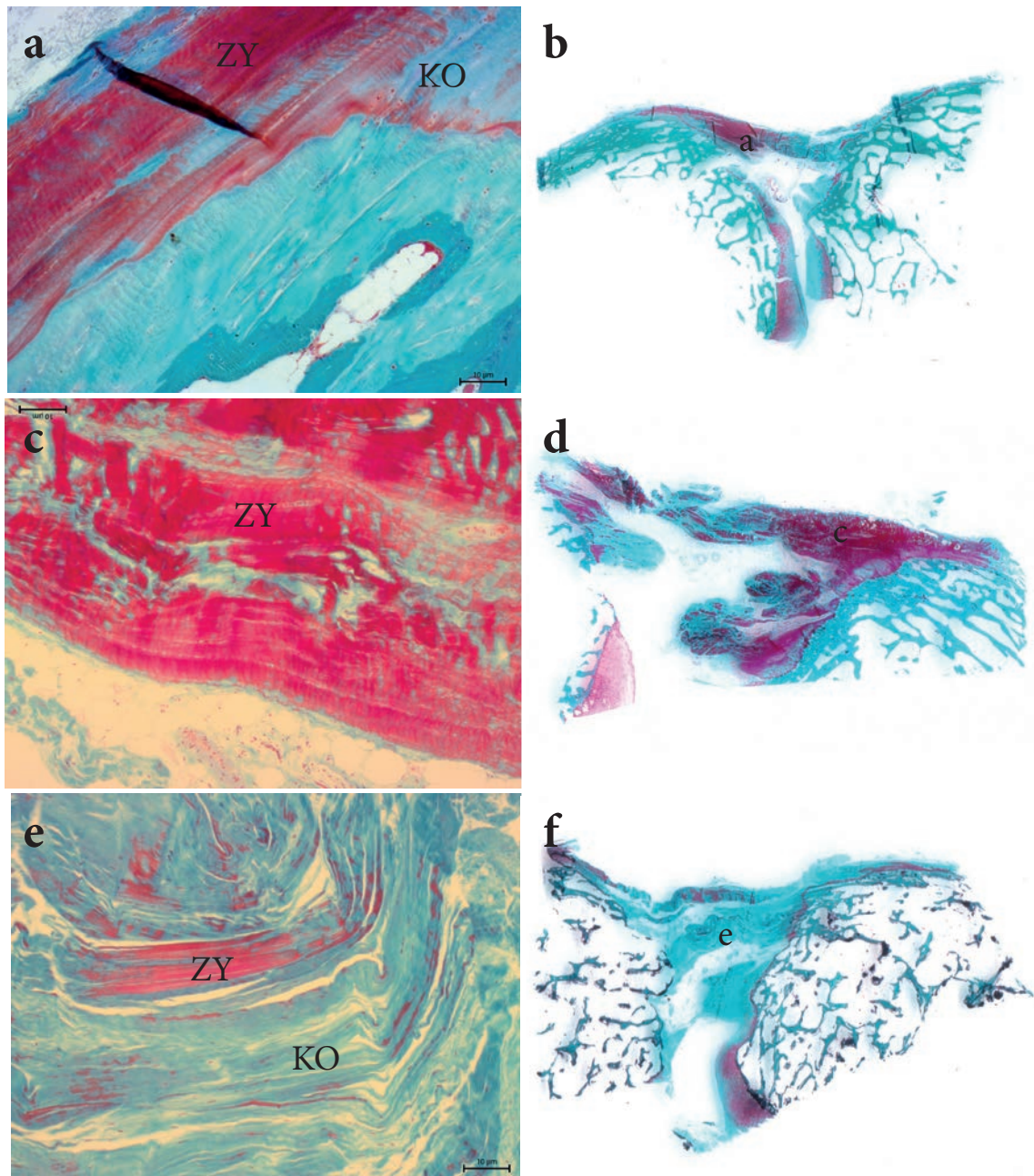


Abbildung 9: Vordere Syndesmose (a) bis (f) zytoplasmareicher Bandbereich ZY, kollagenfaserreicher Bandbereich KO. (a) Lig. S2.1 (c) Lig. S3.1 (e) Lig. S4.1, (b) Enthesis I zytoplasmareicher, Mitte und Enthesis II kollagenfaserreich (d) Enthesis II zytoplasmareicher (f) Enthesis I und II faserreicher (Masson-Goldner, 50X).

4.3. Rasterelektronenmikroskopische Bilddokumentation und Auswertung

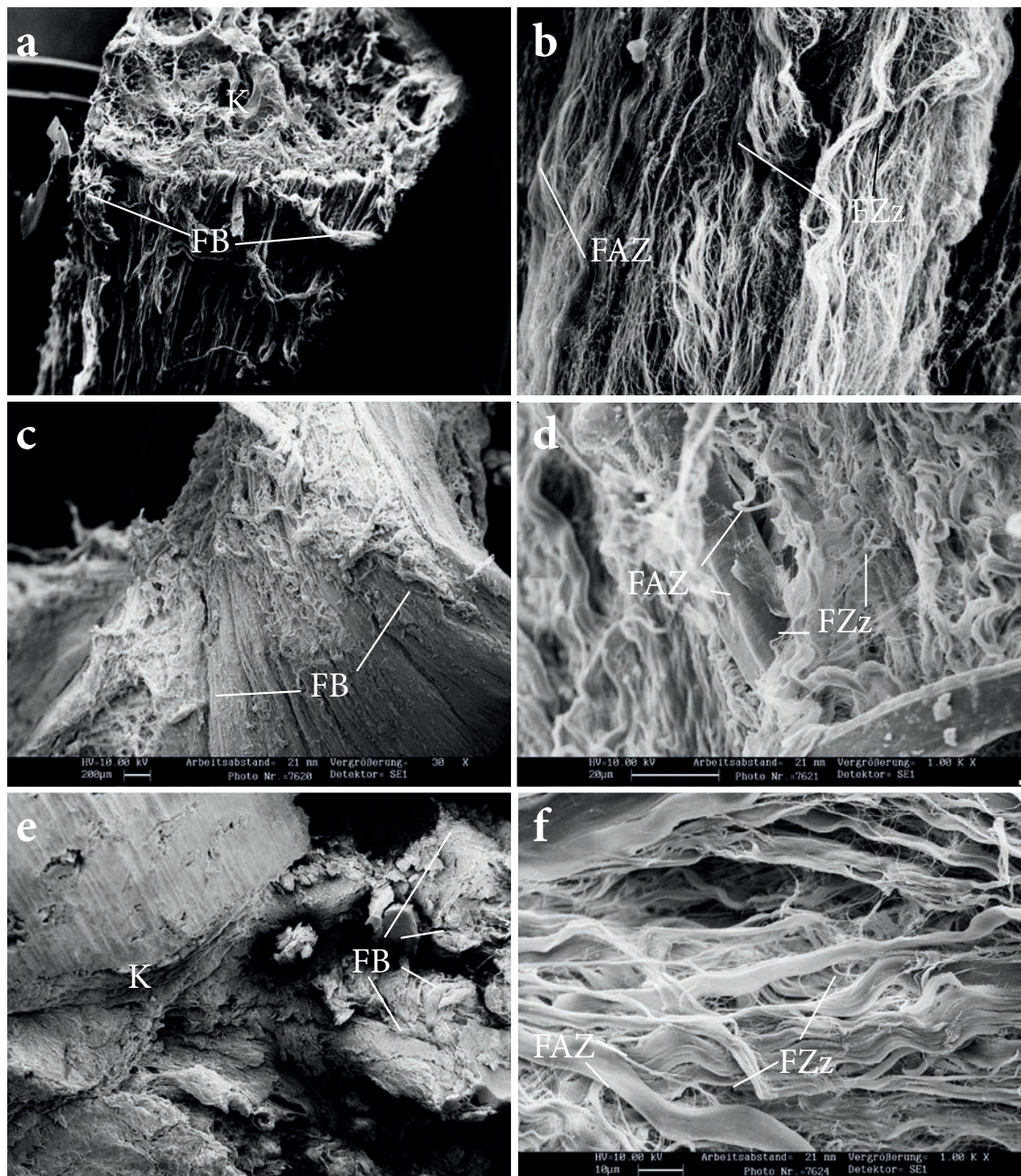


Abbildung 10: REM Aufnahmen vordere Syndesmose S3.1 (a) Osteo-ligamentärer Übergang Knochen K, Faserbündel FB (REM 30X). (b) Nahaufnahme des ligamentären Anteils mit Faszikel FAZ und Kollagenfaser FZz gewellt (REM 1000X). (c) Lig. fibulotalare anterius F3.1, ligamentärer Anteil, Faserbündel FB (REM 30X). (d) Nahaufnahme des ligamentären Anteils mit Faszikel FAZ und Kollagenfaser FZz gewellt (REM 1000X). (e) Lig. interosseum S3.2 osteo-ligamentärer Übergang, Knochen K, Faserbündel FB quer angeschnitten (REM 30X). (f) Nahaufnahme des ligamentären Anteils mit Faszikel FAZ und Kollagenfaser FZz gewellt (REM 1000X).

Die vordere Syndesmose S3.1 ist deutlich weniger kompakt als die übrigen Syndesmosenbänder. Bei 30facher Vergrößerung zeigen sich parallele, lockere, als Einzel-faserbündel angeordnete Strukturen, die frontal parallel zueinander in den Knochen

einstrahlen. Die Fasern wirken plump und ungeordnet. Bei 1000facher Vergrößerung sind wellige, parallele, hauchdünne Einzelfasern zu sehen (Abb. 10 (a)(b)).

Die *vordere Syndesmose S4.1* ist bei 30facher Vergrößerung in mehrere Faserbündel geteilt und in sich gewunden. Das gesamte Band strahlt tangential in den Knochen ein. In 1000facher Vergrößerung sind die Einzelfasern streng parallel und wellig angeordnet.

Das *Lig. interosseum S3.2* zeigt bei 30facher Vergrößerung einen kompakten und quer angeschnittenen geraden Faserverlauf. In 1000facher Vergrößerung sind die Einzelfasern dagegen wellig und eher locker angeordnet (Abb. 10 (e)(f)).

Das *Lig. interosseum S4.2* ist bei 1000facher Vergrößerung in sich gedreht und setzt sich aus strangartigen, ungeordnet verlaufenden Faserbündeln zusammen. Die einzelnen Bündel werden durch netzartige Faserstrukturen verbunden.

Die *hintere Syndesmose S3.3* ist bei 30facher Vergrößerung ein kompakter Einzelstrang, auf der Oberfläche sind kleine gespinstartige Auflagerungen zu beobachten, welche der kompakten parallelen Bandmasse aufliegen. In 1000facher Vergrößerung zeigt sich eine parallele strangartige Anordnung der Faserbündel, welche glatt gezogen erscheinen. Die Einzelfasern sind in sich gedreht. Querverlaufende Fasern sind nicht sichtbar.

Die *hintere Syndesmose S4.3* hat bei 1000facher Vergrößerung denselben Aufbau wie S4.2.

Das *Lig. fibulotalare anterius F3.1* weist bei 30facher Vergrößerung eine strangartige Gestalt auf. Es deuten sich Einzelbündel an. Dem Band liegen vernetzte Auflagerungen, welche wie Einzelfasern aussehen, auf. Die Bündel erscheinen sehr kompakt und in dieser Vergrößerung glatt. Das gesamte Band weist eine Krümmung auf. In 1000facher Vergrößerung sieht man Faszikel, in kompakten dicken Einzelsträngen. Daneben finden sich teils winzig dünne, kaum sichtbare netzartige Fasern und abgeplattete spiralförmig verlaufende Faserbündel. Diese umgeben große kompakte Fasern (Abb. 10 (c)(d)).

Im *Lig. fibulotalare anterius F4.1* sind bei 30facher Vergrößerung zwar Einzelstränge des Bandes zu sehen, diese sind jedoch in kompaktem Verbund, der Übergang zum Knochen erscheint abrupt.

Beim *Lig. fibulocalcaneare F 4.2* werden bei 30facher Vergrößerung Einzelfasern sichtbar, welche teils parallel, teils quer vernetzt verlaufen.

Das *Lig. fibulocalcaneare F 3.2* imponiert bei einer 30fachen Vergrößerung als kompakter Strang, der von ungeordneten, aufgerauten, blind endenden Fasern umgeben ist. Einzelbündel sind hier nicht abgrenzbar, die Anordnung ist streng parallel. In 1000facher Vergrößerung sieht man in sich leicht eingedrehte Bündel mit erkennbaren Einzelfasern. Netzartige oder korkenzieherartige Formen fehlen.

Das *Lig. fibulotalare posterius F3.3* ist bei 30facher Vergrößerung in dicke Einzelstränge gegliedert. Diese sind in ihrer Gesamtlänge gekrümmt und erwecken den Eindruck einer Querstreifung in den besonders dicken Faserbündeln.

Das *Lig. fibulotalare posterius F4.3* zeigt bei 30facher Vergrößerung einen osteoligamentären Übergang. Der Bandursprung setzt sich im trabekulären Verlauf des ossären Ansatzes fort. Bei 1000facher Vergrößerung sind einzelne Faserbündel korkenzieherartig in sich gewunden und durch netzartige, hauchdünne Fasern miteinander verbunden.

Aufgrund der fehlenden wegweisenden Unterschiede innerhalb der Untersuchungsergebnisse, auch unter maximaler Vergrößerung, wurden nicht alle Bänder mit dem REM untersucht.

4.4. Spektraluntersuchung

Die Spektren der vorderen Syndesmose (S4.1) und des Lig. fibulotalare posterius (F4.3) sind identisch. Der Hauptbestandteil in beiden Bändern, das Kollagen I, ist in gleichen Anteilen vorhanden (Diagr. 5).

Aus diesem Grund wurde die Untersuchung für andere Bänder nicht wiederholt.

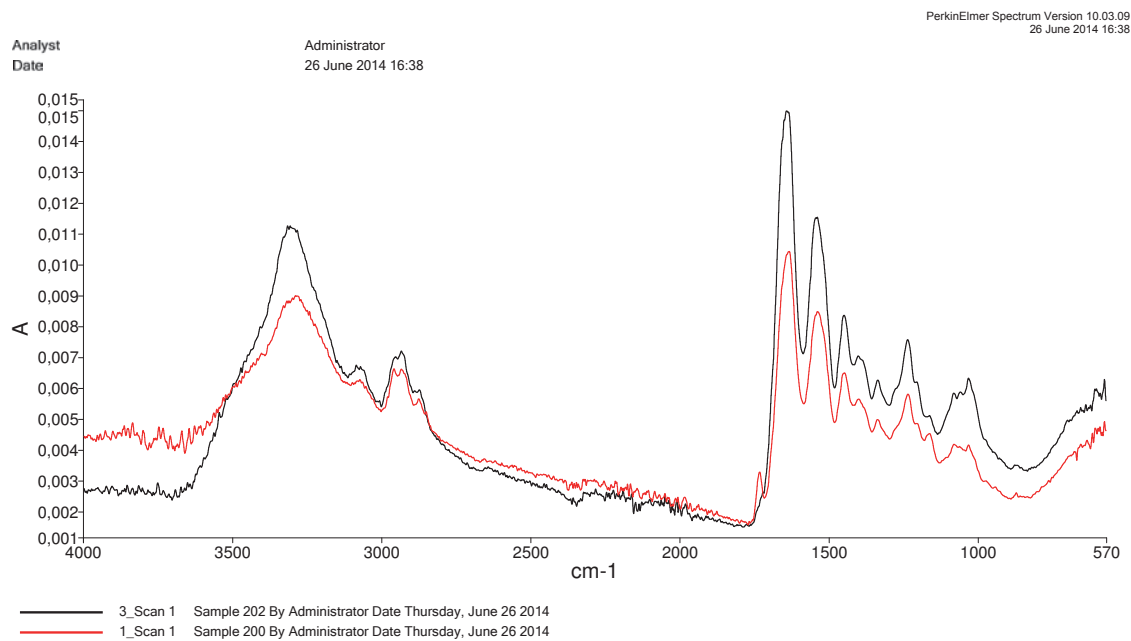


Diagramm 5: Spektraluntersuchung: die schwarze Kurve repräsentiert die Reflektion des Kollagen I haltigen Lig. fibulotalare posterius (Lig. F4.3). Die identische rote Kurve der Kollagen I haltigen vorderen Syndesmose (Lig. S4.1).

5. Diskussion

Die Unversehrtheit der Syndesmosenbänder und des lateralen Seitenbandkomplexes sind die Voraussetzung für ein im Alltag und unter sportlicher Tätigkeit belastbares oberes Sprunggelenk. Der Seitenbandkomplex sichert hierbei lateral die Gelenkführung des Talus in der Gelenkgabel. Die Syndesmose sichert die feste Verklammerung der Gelenkgabel über dem Talus. Durch ein physiologisches Zusammenspiel im Sinne einer Gelenkkette ermöglichen die Bänder gemeinsam den Gehakt (Seiler 1999).

Sprunggelenksdistorsionen machen 85% der Verletzungen von Sportlern in Basketball, Volleyball, Fußball und American Football aus, am häufigsten sind die lateralen Bandstrukturen betroffen (Ebraheim et al. 2006).

Nach Verletzungen des Seitenbandkomplex oder der Syndesmosenbänder imponiert die Klinik zwar zunächst ähnlich, jedoch scheint der weitere Heilungsverlauf, insbesondere verletzter Syndesmosenbänder, länger anzudauern als bei einem verletzten Seitenband (Clanton et al. 2014, Bartonicek 2003, McKeon et al. 2012).

Bislang kann durch Klinik oder Diagnostik die Heilungsdauer oder Rückkehr zum Sport bei Syndesmosenverletzungen nur eingeschränkt vorhergesagt werden (Amendola et al. 2006).

Auch reißen Syndesmosenbänder und Seitenbänder mit unterschiedlicher Häufigkeit mit Überwiegen der Verletzungen ventraler Bandstrukturen wie der vorderen Syndesmose und des Lig. talofibulare anterius (Hoefnagels et al. 2007, Burks and Morgan 1994, Close 1956, Xenos and Hopkinson 1995, Seiler 1999).

Es stellt sich somit die Frage, ob hier ein struktureller Unterschied zwischen dem Seitenbandkomplex und den Syndesmosenbändern vorliegt, der das erklärt.

Daher untersuchten wir vier Sprunggelenke makroskopisch, histologisch, elektronenmikroskopisch und spektroskopisch.

Wie zuvor von anderen Autoren beschrieben (Bartonicek 2003, Ebraheim et al. 2006, Williams et al. 2015, van den Bekerom et al. 2008, Boonthathip 2010, Raheem and O'Brien 2011) imponierten die vordere Syndesmose und das Lig. fibulotalare anterius in der makroskopischen Darstellung der Bänder der vorliegenden Arbeit als besonders dünn und

kurz. Eine Verbindung durch Faserzüge der ventralen Bandstrukturen und der dorsalen Bandstrukturen zueinander lag in allen Fällen vor, ebenso wie der enge Übergang des Seitenbandkomplexes ineinander, analog den Beschreibungen von Sarrafian (Sarrafian 1983). Auch der „kleeblattartige“ Ursprung der Seitenbänder konnte, wie zuvor von Zwipp beschrieben, gesehen werden (Zwipp 1994).

Das Lig. fibulocalcaneare wurde ebenfalls als eher dünn beschrieben (Boonthathip 2010, van den Bekerom et al. 2008) und ist eng mit dem Lig. fibulotalare anterius durch Faserzüge verwoben (Sarrafian 1983). Vega et al. bezeichneten diese Verbindung als lateralen Fibulocalcanearkomplex (Vega et al. 2018). Sie beobachteten in allen untersuchten Ligg. fibulotalare anterius einen zweibündeligen Aufbau. Edama et al. beschreiben in ihrem untersuchten Kollektiv 33% als einbündelig, 57% als zweibündelig und 10% als dreibündelig (Edama et al. 2018). In unseren Proben zeigten sich drei Ligg. fibulotalare anterius zweibündelig und eines einbündelig.

In Messungen wurde das Lig. interosseum breiter, dicker und länger als die vordere Syndesmose beschrieben (Bartonicek 2003, Ebraheim et al. 2006, Williams et al. 2015), was sich mit den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit deckt. In Untersuchungen dieser Arbeit bestand das Lig. interosseum wie bei Fick konstant aus kräftigen Faserzügen, im Gegensatz zur Membrana interossea, die in allen Präparaten eine papierdünne Struktur besaß und digital mühelos von diesem straffen Ligament getrennt werden konnte (Fick 1904). Es wurde daher, wie zuvor durch andere Autoren (Lutz 1941, Hermans et al. 2011, Sarrafian 1983), als eigene Bandstruktur gewertet.

Einige Autoren (Xenos and Hopkinson 1995, Ebraheim et al. 2006, Lutz 1941, Fick 1904, Poirier 1892, Quenu 1907, Bartonicek 2003) beschrieben die hintere Syndesmose und das Lig. fibulotalare posterius kräftiger als die übrigen Bänder. Die beiden dorsalen Bandstrukturen verfügten ebenfalls über Verbindungen durch Faserzüge zueinander, analog zu den Beschreibungen von Sarrafian (Sarrafian 1983). Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit.

Das Lig. transversum hatte in den von uns untersuchten Präparaten einen gemeinsamen Ursprung mit der hinteren Syndesmose und bildete den gelenkzugewandten Teil des Bandes, weshalb es übereinstimmend mit anderen Autoren (Xenos and Hopkinson 1995, Ebraheim et al. 2006, Lutz 1941, Fick 1904, Poirier 1892, Quenu 1907) nicht als eigenes Band interpretiert wurde.

Offen blieb bisher, ob topographische Gegebenheiten und somit die Reihenfolge innerhalb der biomechanischen Kette der Bänder des oberen Sprunggelenkes zu unterschiedlichen Ergebnissen der biomechanischen Reißfestigkeit derselben geführt haben (Ogilvie-Harris et al. 1994, Beumer et al. 2003, Xenos and Hopkinson 1995, Rammelt et al. 2008) oder ob unterschiedliche Ausbildung der zellulären Mikrostrukturen eines oder aller Bänder diesem Verhalten zugrunde liegt.

Aktuelle Literatur befasst sich vor allem mit Aufbau und Funktion von Sehnen und Ligamenten großer Gelenke wie das Kreuz- oder Seitenband des Kniegelenkes (Buschmann and Meier Bürgisser 2017, Suzuki et al. 2015, Cooper and Misol 1970). Vereinzelt wurden Bänder kleiner Gelenke histologisch untersucht wie z.B. das Lig. pisohamatum und das Lig. coracoacromiale (Adamczyk et al. 2008, Rothenberg et al. 2017). Sie geben erste Hinweise auf mögliche mikrostrukturelle Unterschiede in Bändern. Darüberhinaus wurde die Feinstruktur einzelner Sprunggelenksbänder von zwei weiteren Autoren histologisch untersucht (Rein et al. 2015, Kumai et al. 2002).

Eine vergleichende Gegenüberstellung aller Syndesmosenbänder und des Seitenbandkomplexes steht bislang aus.

Benjamin et al. publizierten 1998 über Ansatzstellen von Bändern und Sehnen und nannten diese Enthesis. Entsprechend ihrer Struktur wurden fibröse, gemischt fibröse und faserknorpelige Ansatzstellen unterschieden. Charakteristisch für fibrocartilaginäre Ansatzstellen sind vier verschiedene Gewebezonen: reines straffes Bindegewebe, nichtmineralisierter Faserknorpel, kalzifizierter Faserknorpel und Knochen.

Bei der histologischen Untersuchung der Bandansätze sieht man zwischen unkalzifiziertem und kalzifiziertem Faserknorpel eine basophile Grenzzone, welche als Tidemark bezeichnet wird. Faserknorpel ist gefäßlos, kalzifizierter Knorpel ist zellärmer als nicht kalzifizierter (Benjamin and Ralphs 1998).

Beginn und Ende einer solchen Zone sind schwer zu erkennen, da scharfe Grenzen fehlen. Daher erhielten die Ansatzstücke bisher wenig Beachtung (Benjamin and Ralphs 1998).

Auch in den Untersuchungen des Lig. fibulotalare anterius von Kumai et al. fand sich dieser Enthesis-Aufbau mit Metachromasie (Blaufärbung) im Faserknorpelbereich (Kumai et al. 2002).

Es konnten in der vorliegenden Arbeit in allen Ligamenten mit Knochenansatz mindestens zwei der von Benjamin et al. beschriebenen möglichen vier Zonen in einem Bandansatz gezeigt werden: nicht kalzifizierte Faserknorpelzone, kalzifizierte Faserknorpel Zone, Tidemark und Knochen ebenso die Metachromasie. Somit besaßen alle diese Bänder eine fibrocartilaginäre Enthese.

Dieser Aufbau der Zonen ließ sich wie bei den Untersuchungen von Benjamin et al. auch bei den eigenen Auswertungen weder innerhalb eines Bandes noch innerhalb eines Patienten in identischer Art und Weise reproduzieren (Benjamin et al. 2006).

Wie auch von Benjamin et al. beschrieben waren in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht in jeder Schicht der analysierten Bänder alle vier Zonen vorzufinden. In zehn Fällen waren in beiden Bandansätzen alle vier Zonen nachweisbar. In acht Fällen waren alle vier Zonen in einem Bandansatz nachweisbar.

Benjamin et al. beschrieben als Besonderheit die in der Ansatzstelle vorliegenden Zellen: rundliche Faserknorpelzellen, die in Clustern angeordnet sein können. Sie unterscheiden sich von den Fibrozyten in ihrer Form, sind rund mit großen Zellkernen und färben sich in Toluidinblau häufig lila (Benjamin and Ralphs 1998).

Benjamin et al. postulierten, dass Zellen in Bändern in der Lage sind unterschiedlichen Druck aufzunehmen und als Reaktion die Zusammensetzung ihrer zellulären Matrix zu verändern. Eine Folge daraus sei die Bildung von Faserknorpelmatrix an Stellen, an denen Ligamente unter Druck stehen (Benjamin and Ralphs 1998). Faserknorpelzellen sind mit intermediären Filamenten bepackt, welche eine Druckübertragung umsetzen können. Das enthaltene Aggrecan kann Wasser aufnehmen und Druck widerstehen (Benjamin and Ralphs 1998).

Da nicht alle Ligamente gleich viele Faserknorpelzellen aufweisen, wäre dies als individuelle mikrostrukturelle Ausbildung eines Bandes zu verstehen.

In einer Arbeit mit embryonalen Achillessehngewebe wiesen Benjamin mit der Gruppe um Shaw et al. die Bildung von Faserknorpel bereits bei einem 332 mm Fötus nach (Shaw et al. 2008).

Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass es sich beim Faserknorpel nicht allein um eine degenerative Metaplasie (Mohr 1987), sondern um einen festen Bestandteil der Bänder am Sprunggelenk handelt. Nach Cooper und Misol arrangieren sich die Faserknorpelzel-

len in Paaren, Reihen oder in Lakunen extrazellulärer Matrix (Cooper and Misol 1970). In der vorliegenden Arbeit konnten die Faserknorpelzellen in allen Bändern nachgewiesen werden. Dabei zeigte immer ein Bandende eine höhere Zellenanzahl als das andere.

Faserknorpelzellen finden bei den Untersuchungen von Rein et al. keine Erwähnung (Rein et al. 2015). Sie entfernten an Leichenpräparaten die vordere Syndesmose und den Seitenbandkomplex am Einstrahlpunkt in den Knochen und untersuchten das Gewebe lichtmikroskopisch nach Färbung mit HE und Elastica van Giesson (Rein et al. 2015). Somit kann die fehlende Beschreibung von Faserknorpelzellen möglicherweise auf die Präparation ohne Knochenresektion zurückzuführen sein. In unseren Ergebnissen nahm der Nachweis von Faserknorpelzellen in Bändern, die ohne Knochen reseziert wurden, deutlich ab, da diese vorwiegend knochennah zu finden sind.

Auch Fick suchte vergeblich nach bereits beschriebenen Faserknorpelzellen im Lig. interosseum (Fick 1904).

Zschäbitz et al. gehen aufgrund der geringeren Vaskularisierung von einer schlechteren Heilungstendenz in Faserknorpel aus (Zschäbitz 2005).

Kumai et al. untersuchten das Lig. fibulotalare anterius und fanden als Hauptanteil straffes fibröses Bindegewebe und zwischen den Kollagenfaserbündeln eingebettete Fibroblasten mit gelegentlichen Blutgefäßen in kleinen Lücken (Kumai et al. 2002).

Rein et al. sahen einen typischen Bandaufbau aller Bänder mit zentralen Kollagenbündeln, umgeben von einer externen epiligamentären Hülle, die makroskopisch wie eine Kollagenschicht imponierte, die das Band vollkommen umschloss und ins Periost einstrahlte mit mikroskopisch multidirektionaler Faseranordnung und der Versorgung mit Gefäßen und Nerven dient. Die in den untersuchten Bändern des Seitenbandkomplexes sowie in der vorderen Syndesmose befindlichen Faserstrukturen wurden von Rein et al. als parallel, straffes Kollagenfaserbündel beschrieben (Rein et al. 2015).

Diese Beobachtung konnte in der vorliegenden Arbeit in den Proben aller Bänder sowohl des Seitenband- als auch des Syndesmosenkomplexes bestätigt werden.

Überraschenderweise wurden von Rein et al. keine strukturellen Unterschiede zwischen den einzelnen Seitenbändern gefunden, obwohl das Lig. fibulotalare anterius als schwächstes der Bänder beschrieben wurde (Rein et al. 2015). Ob die Reißkraft damit gemeint war, wird nicht erwähnt.

In den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit war der Faserverlauf der vorderen Syndesmose und hinteren Syndesmose sowie des Lig. fibulotalare anterius und fibulocalcaneare meist sowohl quer als auch längs. Das Lig. interosseum enthielt überwiegend quere Faserbündel. Das Lig. fibulotalare posterius enthielt vorwiegend längs verlaufende Faserbündel. Die Beobachtung des Faserverlaufs erfolgte lichtmikroskopisch im polarisierten Licht. Dabei zeigte sich auch, dass sich die Faserzusammensetzung der hinteren Syndesmose in der histologischen Anordnung als kompakter darstellt.

Cooper et al. untersuchten Kollateralbänder von Hundekniegelenken und zeigten unter TEM, dass diese hauptsächlich aus parallel verlaufenden Fasern mit dazwischen liegenden elongierten Zellen bestehen. Im Übergang in die Faserknorpelzone setzen sich diese Fasern, genau wie im mineralisierten Faserknorpel, fort (Cooper and Misol 1970).

Wir konnten dies vereinzelt lichtmikroskopisch unter Polarisationslicht nachweisen.

Übereinstimmend mit Rein et al. werten wir den untersuchten Faserverlauf durch die Kollagenfaseranordnung und Faserbündeldicke als Hinweis auf die individuelle Anpassung der Bänder an die biomechanischen Anforderungen (Rein et al. 2015).

In allen untersuchten Bändern der vorliegenden Arbeit waren lichtmikroskopisch Fibrozyten, die zigarrenförmig mit wenig bis fehlendem Zytoplasma zwischen den Faserbündeln lagen, im Bereich des straffen parallelfaserigen Bindegewebes zu sehen. Die Zellzahl war variabel von spärlich bis sehr zellreich.

Im Rahmen der Zellquantifizierung fiel bei Patient 2, der deutlich jünger war als die anderen Patienten, eine höhere Zellzahl in den Proben auf.

In 17 von 24 Bändern war die größte Zellzahl auf einer Enthese zu finden, bei den übrigen in der Bandmitte, andere Vorauforen erwähnen dies nicht (Rein et al. 2015, Raheem and O'Brien 2011, Benjamin and Ralphs 1998).

Analog zu Zschäbitz et al. werteten wir eine größere Zellzahl als mögliche bessere Prognose der Heilungstendenz (Zschäbitz 2005).

Es fällt hier der Widerspruch zum vorangehenden Postulat auf, dass Faserknorpel eine geringere Regenerationskraft aufweist. In der vorliegenden Arbeit wiesen einige Enthesis die größte Zellzahl mit großen Zellkernen des gesamten Bandverlaufs jedoch in der Zone mit Faserknorpel auf.

Für Prognosen zur Heilungstendenz ist weiterhin eine Einteilung der Bänder entsprechend der Beziehung zur Gelenkkapsel üblich. Kapsuläre Bänder weisen demnach eine besonders gute Regenerationsfähigkeit aufgrund der guten Vaskularisation auf. Intra- und extrakapsuläre Bänder haben dagegen eine verminderte Vaskularisation und daher geringere Heilungstendenz (Yildiz and Yalcin 2013, Zschäbitz 2005).

Eine Arbeit von Mroz et al. wies eine Variationsbreite der Durchblutung der vorderen Syndesmose nach. Insbesondere bei Abwesenheit des lateralen anterioren arteriellen Astes ist die Durchblutung vermindert (5,8 vs. 3,8%). In 28% wird die vordere Syndesmose nur durch die fibulare Arterie versorgt (Mroz et al. 2018), was zu einer schlechteren Vaskularisierung führen könnte. Bei der Quantifizierung der Gefäßgruppen zeigte sich die vordere Syndesmose durchgehend gefäßarm, das Lig. fibulotalare anterius dagegen gut vaskularisiert. Innerhalb des Syndesmosenkomplexes war das Lig. interosseum am besten durchblutet. Demnach könnte man hier eine bessere Regenerationsfähigkeit vermuten, bei der vorderen Syndesmose hingegen eine schlechtere.

Die Zytoplasma- und Kollagenfaserverteilung wurde in den eigenen Untersuchungen der Bänder durch die Masson Goldner Färbung visualisiert. Die Verteilung war wechselhaft niedrig oder hoch, auch innerhalb verschiedener Schichten eines Bandes ohne erkennbaren Unterschied der Fasern oder Zellen. Eine Häufung von bestimmten Bändern oder Probanden war nicht nachweisbar. Sowohl der offensichtliche Faserbereich als auch der bindegewebige Teil waren mal zytoplasmareich oder -arm. Auch eine systematische Färbung aller Enthesis im Vergleich zur Bandmitte ergab sich nicht. Vergleichbare Untersuchungen hierzu liegen in der Literatur nicht vor.

Auch finden sich keine vergleichbaren Rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen aller humaner Sprunggelenksbänder. Deshalb ist ein Abgleich der Faserstruktur der Syndesmosenbänder und des Seitenbandkomplexes des oberen Sprunggelenkes mit früheren Studien nicht möglich.

Suzuki et al. fanden mit Messungen unter Transmissionsemissions Elektronenmikroskop (TEM) (80KV) mit einer Vergrößerung von 20 000X im humanen Kreuzband Unterschiede der Kollagenfibrillenanzahl und der Durchmesser der Einzelfibrillen in den drei Teilkomponenten des Kreuzbandes (Suzuki et al. 2015). Sie stellten dünnere multidirektionale Fibrillen im posterolateralen Bündel ($66,8 \pm 7,7$ nm) und dickere unidirektionale Fibrille im antero-medialen Bündel (83 ± 11 nm) dar, die sie mit denen von Sehnen verglichen.

Laut Zschäbitz nimmt der Durchmesser von Sehnenfibrillen im Alter ab (Zschäbitz 2005).

Cooper et al. zeigten bei ihren Untersuchungen von Hundeseitenbänder der Kniegelenke im TEM (25 micron/50 KV/0,5 μ m) einen Durchmesser der Kollagenfasern zwischen 250 und 1400 Angström. In Querschnitten derselben Bänder wurden straffe Filamente mit 35 bis 75 Angström Durchmesser gefunden. Auch elastische Fasern konnten dazwischen nachgewiesen werden. Die Autoren zeigten den Übergang aller vier Enthesis Zonen eines Bandes mit zunehmender Einlagerung von Mineralien zwischen den parallelen Fasern in der mineralisierten Faserknorpelzone sowie auch die chondrozytenartige Form der Faserknorpelzellen. Diese bleiben auch in der mineralisierten Umgebung aktiv.

Im Rahmen der eigenen REM Untersuchungen zeigten sich bei einer maximalen Vergrößerung von 1000X das Lig. interosseum S4.2 und die Ligg. fibulotalare posteriores F4.3 und F3.3 durch ungeordnete Netze und Faserbündelanordnungen geprägt. Die übrigen Bänder wiesen innerhalb der Faserbündel eine dicht gepackte parallele Anordnung auf. Die Faserbündeldurchmesser waren wechselhaft und weder innerhalb eines Stranges, eines Bandtypus noch bei einem Patienten reproduzierbar. Die unterschiedlichen Zonen und Zellen blieben der Untersuchung unter Lichtmikroskopie vorbehalten.

Somit konnte bisher kein Unterschied zwischen dem Syndesmosenband- und Seitenbandkomplex auf rasterelektronenmikroskopischer Ebene gefunden werden. Eine Analyse der unterschiedlichen Größe und Anordnung einzelner Fibrillen bzw. von Intermediärfilamenten in unseren Sprunggelenksligamenten wäre ein Ansatz für weitere Untersuchungen unter TEM.

In der vorliegenden Arbeit konnte erstmals histologisch gezeigt werden, dass die individuelle histologische Feinstruktur der verschiedenen Bänder des lateralen humanen Sprunggelenks einerseits durch die unterschiedliche Faseranordnung und den unterschiedlichen Gehalt an Faserknorpelzellen geprägt ist.

Die angeführten Arbeiten und die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen geben möglicherweise Hinweise darauf, dass eine individuelle mikrostrukturelle Anpassung der Bänder vorliegt. Jedoch können unsere Ergebnisse diesen Aufbau nicht auf einzelne Bandtypen einengen. Somit ist die vermehrte Rupturanfälligkeit und Heilungstendenz einzelner Bänder am Sprunggelenk auf anatomische und biomechanische Gegebenheiten zurückzuführen.

Limitationen

Zur histologischen und REM Untersuchung von Sprunggelenksbändern musste auf Leichenpräparate zurückgegriffen werden. Daher stammen alle Bänder von älteren Patienten (42 bis 81 Jahre).

Die erste Serie an Bändern wurde am knöchernen Ansatz abgesetzt. Aufgrund des insgesamt kleinen Bandvolumens und dadurch erheblichen Gewebe- und Informationsverlustes wurden bei den folgenden 3 Serien auch die knöchernen Ansätze mit entnommen. Die Bänder wurden initial mit Faden markiert.

Eine zeitnahe Untersuchung nach Versterben der Patienten konnte nicht gewährleistet werden, daher waren immunhistochemische Untersuchungen nicht möglich.

Aufgrund der geringeren Größe der knöchernen Ansätze und der kleinen Volumina der Bandteile konnte der tibiale und fibulare Anteil nicht über den gesamten Verarbeitungsprozess zuverlässig markiert werden. Eine Unterscheidung der Knochen-Ursprünge zwischen Tibia, Fibula, Talus und Calcaneus war daher nicht möglich.

Die Schnitte waren alle 4 μm dick und hatten keinen Einfluss auf die Kompaktheit der Bänder.

Wie bei der Beschreibung der Makroskopie geschildert, verlaufen die Bänder in Winkeln bis zu 60° und bestehen aus individuell unterschiedlichen Faserbündeln. Es war nicht möglich in allen Bändern den gleichen Schnittwinkel zu finden, um eine direkte Vergleichbarkeit herzustellen.

In dieser Arbeit sollte ausschließlich geklärt werden, ob es morphologische Unterschiede der Mikrostrukturen gibt. Daher wurde auf besondere Patienten-Daten nicht eingegangen.

Es wurden lediglich von 2 Patienten REM Bilder gefertigt. Diese waren in der Auswertung identisch, so dass auf weitere Untersuchungen verzichtet wurde.

Die Auflösung des REM war auf 1000fache Vergrößerung begrenzt, somit konnte nicht unterhalb der Faserebene untersucht werden. Die Ebene der Fibrillen und Organellen konnten ebenso wie Mikrofilamente in dieser Arbeit nicht dargestellt werden.

In den Bildern befinden sich kleine Fragmente - kristalline Partikel. Wir gehen in diesem Fall von einer Verunreinigung im Prozess der Gefrierpunkttrocknung und Bespatterung aus.

Bei der Spektraluntersuchung zeigte der Vergleich des Lig. fibulotalare posterius und der vorderen Syndesmose keinen Unterschied, so dass wir die Untersuchungen bei den folgenden Serien nicht wiederholten.

Die Bänder befinden sich in vivo unter Spannung. Sobald sie entnommen werden schrumpfen sie und nehmen sogar eine andere Form im Sinne einer Wellung an, können also nicht in ihrer ursprünglichen Form untersucht werden.

Zuletzt rechtfertigten die Ergebnisse dieser Arbeit keine Ausweitung der Bandentnahmen, so dass es bei einer kleinen Fallzahl blieb.

Die Zellzählung war als absolute Gesamtzahl unzuverlässig, daher erfolgten jeweils zwei Stichproben in definierten Bandausschnitten.

Eine Zählung jedes einzelnen Gefäßes war praktisch nicht durchführbar, daher wurden Gefäßgruppen gezählt.

Auf eine statistische Untersuchung wurde bei fehlender Repräsentativität und zu kleiner Stichprobengröße verzichtet, da kein signifikantes Ergebnis zu erwarten war.

6. Zusammenfassung

Nach einer umfassenden Literaturanalyse zur Anatomie der Syndesmose und lateralen Seitenbänder am oberen Sprunggelenk bis 2018 wurden zur Untersuchung der Feinstruktur 24 Präparate aus dem Syndesmosen- und Außenbandkomplex von 2 männlichen und 2 weiblichen verstorbenen Patienten im Alter zwischen 42 und 81 Jahren entnommen. Die Präparate wurden an den Enden markiert, in Formaldehyd fixiert, für die lichtmikroskopische Untersuchung in Kunststoff eingebettet und zu histologischen Präparaten aufgearbeitet. Zwölf Bänder wurden zusätzlich elektronenmikroskopisch untersucht, bei zwei Bändern wurde die Kollagenstruktur spektroskopisch analysiert.

Unter dem Lichtmikroskop wiesen alle untersuchten Bänder straffes, fibröses Bindegewebe mit zwischen den Kollagenfaserbündeln eingebetteten Fibrozyten sowie kapillaren Blutgefäßen in kleinen Lücken auf. Beim jüngsten Patienten 2 fiel eine größere Zellzahl in den Stichproben auf. Die vordere Syndesmose war durchgehend gefäßarm, das Lig. fibulotalare anterius erwies sich am gefäßreichsten. Innerhalb der Syndesmose zeigte das Lig. interosseum die beste Vaskularisierung.

An den Ansatzpunkten der Bänder gibt es einen fließenden Übergang der Fasern in den Knochen, welcher in bis zu 4 Zonen eingeteilt wird. Hier findet sich Faserknorpel. In der vorliegenden Arbeit waren in 18 von 24 Bändern alle 4 Zonen in einer Enthese nachzuweisen. Bei 17 von 24 Bändern war eine Seite bezüglich der Anzahl an Faserknorpelzellen der anderen überlegen.

Der Faserverlauf ist in jedem Band individuell. Die Fasern strahlten zonenübergreifend an bzw. in den Knochen ein.

Im Rahmen der REM- und Spektroskopie-Untersuchungen konnten keine bandspezifischen Unterschiede gefunden werden. Es gibt Hinweise, dass Faserknorpel zum regelhaften Aufbau der Bandstrukturen am oberen Sprunggelenk gehört.

Erschwert wird eine endgültige Aussage durch die kleine Stückzahl der Proben sowie fehlende Proben junger Individuen. Somit lassen sich die Beobachtungen bisher nicht verallgemeinern. Auch sollten weiterführende Analysen der Sprunggelenksbänder zu molekularen Feinstrukturen der Kollagenfasern Gegenstand zukünftiger Studien sein.

Die erstmalig in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigten Unterschiede in den einzelnen Bandstrukturen auf. Es konnten jedoch keine Merkmale gefunden werden, die nachweislich Rückschlüsse auf eine mikrostrukturell bedingte Rupturanfälligkeit einzelner Bänder zulassen, so dass diese Rupturanfälligkeit den anatomisch-biomechanischen Gegebenheiten zugeschrieben werden muss.

Summary

After a comprehensive literature research on the anatomy of syndesmosis and lateral ligaments of the upper ankle until 2018, 24 specimens from the syndesmotic and outer ligament complex of two male and two female deceased patients between the ages of 42 and 81 years were taken to examine the fine structure. The preparations were labeled at the ends, fixed with formaldehyde, embedded in plastic and processed to histological preparations. Twelve ligaments were additionally examined by electron microscope and in two ligaments, the collagen structure was analyzed spectroscopically.

Under the light microscope all the ligaments examined showed tight fibrous connective tissue with fibrocytes embedded between the collagenous fibers as well as capillary vessels in small gaps.

In the youngest patient 2 a large number of cells was found in all samples. The anterior syndesmosis continuously contained fewer vessels, the anterior talofibular ligament showed the highest amount of vessels. Within the syndesmotic ligaments the interosseous ligament showed the best vascularization.

At the attachment points of the ligaments there was a fluid transition of the fibers into the bone which is divided into up to four zones. Here you will find fibrocartilage. In the present work all zones were to be detected in 18 of 24 ligaments in one enthesis. In 17 of 24 ligaments one side was superior to the other in number of fibrocartilage cells.

Fibers run individually in each ligament. They radiated across zones or into the bone.

Within the framework of the SEM and spectroscopy investigations no ligament specific differences could be found. However, there are indications that fibrocartilage belongs to the regular structure of ligaments in the upper ankle joint.

A final statement proves difficult due to the small number of samples and missing samples of young individuals. Thus, the observations cannot be generalized so far. Also, further analysis of the ankle ligaments to molecular fine structures of collagen fibers should be the subject of future studies. The investigations carried out for the first time in this work showed differences in the individual ligament structures. However, no features could be found which demonstrably allow the conclusion to be drawn regarding the microstructural rupture susceptibility of individual ligaments, so that the susceptibility to rupture must be attributed to anatomical-biomechanical conditions.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: Oberes Sprunggelenk von (a) ventral, (b) lateral und (c) transversal. Syndesmose, Seitenbandkomplex (Zeichnung MB2016).....	5
ABBILDUNG 2: MRT eines rechten oberen Sprunggelenkes, axiale Schichten beginnend (a)-(c) (AKAAItona, Radiologie).....	6
ABBILDUNG 3: Präparation Syndesmose und des lateralen Seitenbandkomplexes.....	20
ABBILDUNG 4: Präparation Syndesmose und des lateralen Seitenbandkomplexes.....	21
ABBILDUNG 5: Präparation Syndesmose und des lateralen Seitenbandkomplexes, dorsale Ansicht.....	22
ABBILDUNG 6: Lig. fibulotalare anterius F3.1 Enthesis (a) Zonen Zeichnung (MB 2017) (b) (Toluidin blau 50X).....	27
ABBILDUNG 7: Vordere Syndesmose (a) S3.1 und (b) S4.1 Enthesis Zonen.....	27
ABBILDUNG 8: (a) Lig. fibulotalare posterius S2.3 (Scan 2100dpi, Toluidin Blau, 50X, Toluidinblau 400X).....	28
ABBILDUNG 9: Vordere Syndesmose (a) S2.1 (c) S3.1 (e) S4.1 (Masson-Goldner, 50X).....	32
ABBILDUNG 10: REM Aufnahmen vordere Syndesmose S3.1 (c) Lig. fibulotalare anterius F3.1 (REM 30X, REM 1000X). (c) Lig. fibulotalare anterius F3.1 (REM 1000X). (e) Lig. interosseum (REM 30X). (f) (REM 1000X).....	33

7.2. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: Maße des Syndesmosen- und Seitenbandkomplexes.....	10
TABELLE 2: Histologischer Vergleich von Ligamenten und Sehnen.....	15
TABELLE 3: Patienten zur Sprunggelenksbandentnahme.....	18
TABELLE 4: Systematische Beschriftung der Sprunggelenksbänder.....	18
TABELLE 5: Lichtmikroskopische Untersuchung zur Morphologie des Seitenband- und Syndesmosenkomplexes.....	26

7.3. Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 1: Anteil der Enthesiszonen.....	26
DIAGRAMM 2: Anzahl der Zellkerne.....	30
DIAGRAMM 3: Anzahl der Gefäßgruppen.....	31
DIAGRAMM 4: Anteil der rot-grün Anreicherung eines Bandes in der Masson Goldner Färbung.....	31
DIAGRAMM 5: Spektraluntersuchung Kollagen I Lig. fibulotalare posterius (Lig. F4.3), vordere Syndesmose (Lig. S4.1).....	36

7.4. Abkürzungen

LTFA	Lig. tibiofibulare anterius
LTFI	Lig. tibiofibulare interosseum
LTFP	Lig. tibiofibulare posterius
MI	Membrana interossea
LFTA	Lig. fibulotalare anterius
LFC	Lig. fibulocalcaneara
LFTP	Lig. fibulotalare posterius
LT	Lig. transversum
T	Talus
Ti	Tibia
F	Fibula
Mp	Mm. peronei longus et brevis
Rf	Retinaculum flexorum
Me	M. extensor digitorum longus
Re	Retinaculum extensorum superius
EI	Enthesis 1
EII	Enthesis 2
Mitte	Bandmitte
FKZ	Faserknorpelzelle
FAZ	Faszikel
FZz	Kollagenfaser
FB	Faserbündel
K	Knochen
KK	Kalzifizierter Faserknorpel
TM	Tidemark
FK	Faserknorpel
FKZ	Faserknorpelzelle
UF	Unkalzifizierter Faserknorpel
CF	Kalzifizierter Faserknorpel
B	Bone
ZY	Zytoplasma
SEM	Scanning electron microscope
REM	Rasterelektronenmikroskop
TEM	Transmissionsemissionselektronenmikroskop
GAG	Glucosaminoglycane
SMA	Alpha Smooth Muscle Actin
KO	Kollagenfaser

7.5. Danksagung

Herrn Professor Wening danke ich besonders für die Themenstellung, die hervorragende jahrelange Betreuung, Inspiration neuer Ideen und sein unendliches Engagement für diese Arbeit und meine berufliche Laufbahn. Unter seiner Leitung durfte ich meine chirurgische Karriere beginnen und das Interesse an wissenschaftlicher Arbeit entdecken.

Herrn Dr. Hahn, Institut für Osteologie und Biomechanik des Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf, danke ich besonders für die grenzenlose stetige Unterstützung bei allen Arbeitsschritten, die freundliche Aufnahme durch seinen gesamten Arbeitskreis und wertvolle neue technische Anregungen, die diese Arbeit möglich gemacht haben. Insbesondere für die mühevollen Arbeit des Korrekturlesens möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Ich möchte mich besonders bei Professor Püschel, Leiter des Instituts für Rechtsmedizin des Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf bedanken. Nur durch seine volle Unterstützung und die freundliche Aufnahme in seinen Arbeitskreis, erhielt ich die Möglichkeit, diese Arbeit umzusetzen.

Ich möchte mich bei Professor Amling, Leiter des Instituts für Osteologie und Biomechanik des Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen.

Bei meinen Eltern, Sascha, Klengi und Frederik möchte ich mich ganz besonders bedanken für die uneingeschränkte, liebevolle und vielseitige Unterstützung in meinem Leben. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

7.6. Lebenslauf

Entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

7.7. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Nele Muro Bushart

7.8. Literatur- und Quellenverzeichnis

- Adamczyk C, Milz S, Tischer T, Putz R and Benjamin M (2008) An immunohistochemical study of the extracellular matrix of entheses associated with the human pisiform bone. *J Anat* 212: 645-653.
- Amendola A, Williams G and Foster D (2006) Evidence-based approach to treatment of acute traumatic syndesmosis (high ankle) sprains. *Sports Med Arthrosc* 14: 232-236.
- Barnett CH and Napier JR (1952) 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.
- Bartonicek J (2003) Anatomy of the tibiofibular syndesmosis and its clinical relevance. *Surg Radiol Anat* 25: 379-386.
- Belbachir K, Noreen R, Gouspillou G and Petibois C (2009) Collagen types analysis and differentiation by FTIR spectroscopy. *Anal Bioanal Chem* 395: 829-837.
- Benjamin M and Ralphs JR (1998) Fibrocartilage in tendons and ligaments--an adaptation to compressive load. *J Anat* 193 (Pt 4): 481-494.
- Benjamin M, Toumi H, Ralphs JR, Bydder G, Best TM and Milz S (2006) Where tendons and ligaments meet bone: attachment sites ('entheses') in relation to exercise and/or mechanical load. *J Anat* 208: 471-490.
- Beumer A, van Hemert WL, Swierstra BA, Jasper LE and Belkoff SM (2003) A biomechanical evaluation of the tibiofibular and tibiotalar ligaments of the ankle. *Foot Ankle Int* 24: 426-429.
- Boonthathip M (2010) Tibiofibular Syndesmotic Ligaments: MR Arthrography in Cadavers with Anatomic Correlation. *Radiology* 254: 827-836.
- Böttner F (2010) *Facharztkompandium Othopädie und Unfalchirurgie*, Berlin, OrthoForum.
- Brostrom L (1966) Sprained ankles. V. Treatment and prognosis in recent ligament ruptures. *Acta Chir Scand* 132: 537-550.
- Burks RT and Morgan J (1994) Anatomy of the lateral ankle ligaments. *Am J Sports Med* 22: 72-77.
- Buschmann J and Meier Bürgisser G (2017) *Biomechanics of tendons and ligaments*, Elsevier.
- Clanton TO, Ho CP, Williams BT, Surowiec RK, Gatlin CC, Haytmanek CT and LaPrade RF (2014) Magnetic resonance imaging characterization of individual ankle syndesmosis structures in asymptomatic and surgically treated cohorts. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*: DOI 10.1007/s00167-00014-03399-00161.
- Close JR (1956) Some Applications of the Functional Anatomy of the Ankle Joint. *The Journal of Bone and Joint Surgery* 38-A, No.4: 761-781.
- Colville MR, Marder RA, Boyle JJ and Zarins B (1990) Strain measurement in lateral ankle ligaments. *Am J Sports Med* 18: 196-200.

- Cooper RR and Misol S (1970) Tendon and ligament insertion. A light and electron microscopic study. *J Bone Joint Surg Am* 52: 1-20.
- Ebraheim NA, Taser F, Shafiq Q and Yeasting RA (2006) Anatomical evaluation and clinical importance of the tibiofibular syndesmosis ligaments. *Surg Radiol. Anat.* 28: 142-149.
- Edama M, Kageyama I, Kikumoto T, Nakamura M, Ito W, Nakamura E, Hirabayashi R, Takabayashi T, Inai T and Onishi H (2018) Morphological features of the anterior talofibular ligament by the number of fiber bundles. *Ann Anat* 216: 69-74.
- Fawcett Ba (1986) A textbook of histology, Saunders Company.
- Fick R (1904) *Handbuch der Anatomie des Menschen, Bd. 2: Bänder, Gelenke und Muskeln*, Jena, Fischer.
- Funk JR (2011) Ankle injury mechanisms: lessons learned from cadaveric studies. *Clin Anat* 24: 350-361.
- Ge SM (2018) Ligaments vs. tendons in joint reconstruction: an review of histology and biomechanics. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal* 8: 246-254.
- Golano P, Vega J, de Leeuw PA, Malagelada F, Manzanares MC, Gotzens V and van Dijk CN (2016) Anatomy of the ankle ligaments: a pictorial essay. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 24: 944-956.
- Grass R, Herzmann K, Biewener A and Zwipp H (2000) Injuries of the inferior tibiofibular syndesmosis. *Unfallchirurg* 103: 520-532.
- Gursoy M, Dag F, Mete BD, Bulut T and Uluc ME (2015) The anatomic variations of the posterior talofibular ligament associated with os trigonum and pathologies of related structures. *Surg Radiol Anat* 37: 955-962.
- Hawe W, Lippert MJ and Bennett P (1989) [Functional anatomy of the upper ankle joint]. *Sportverletz Sportschaden* 3: 1-5.
- Hermans JJ, Beumer A, de Jong TA and Kleinrensink GJ (2011) Anatomy of the distal tibiofibular syndesmosis in adults: a pictorial essay with a multimodality approach. *J Anat* 217: 633-645.
- Hoefnagels EM, Waites MD, Wing ID, Belkoff SM and Swierstra BA (2007) Biomechanical comparison of the interosseous tibiofibular ligament and the anterior tibiofibular ligament. *Foot Ankle Int* 28: 602-604.
- Inman VT (1976) *The joints of the ankle*, Williams&Wilkins Baltimore.
- Kumai T, Takakura Y, Rufai A, Milz S and Benjamin M (2002) The functional anatomy of the human anterior talofibular ligament in relation to ankle sprains. *J Anat* 200: 457-465.
- Lauge Hansen N (1963) Knöchelbrüche und Bandverletzungen des Fußgelenkes und des Fußes. Die genetische Reposition und Retention. *Zbl. Chir.* 87, No.15: 545-560.
- Lauge-Hansen N (1950) Fractures of the ankle. II. Combined experimental-surgical and experimental-roentgenologic investigations. *Arch Surg* 60: 957-985.

- Lilyquist M, Shaw A, Latz K, Bogener J and Wentz B (2016) Cadaveric Analysis of the Distal Tibiofibular Syndesmosis. *Foot Ankle Int* 37: 882-890.
- Lutz W (1941) Zur Struktur der unteren Tibiofibularverbindung und der Membrana interossea cruris. *Zeitschr. f. Anat. u. Entwicklungsgesch.* Bd. 111: 315-321.
- McKeon KE, Wright RW, Johnson JE, McCormick JJ and Klein SE (2012) Vascular anatomy of the tibiofibular syndesmosis. *J Bone Joint Surg Am* 94: 931-938.
- Mohr W (1987) *Pathologie des Bandapparates*, Springer.
- Mroz I, Bachul PJ, Tomaszewski KA, Bereza T, Gil K, Walocha JA and Pasternak A (2018) Classification system of the tibiofibular syndesmosis blood supply and its clinical relevance. *Sci Rep* 8: 10507.
- Neumann HW (2012) *AE-Manual der Endoprothetik- Sprunggelenk und Fuß*, Springer.
- Ogilvie-Harris DJ, Reed SC and Hedman TP (1994) Disruption of the ankle syndesmosis: biomechanical study of the ligamentous restraints. *Arthroscopy* 10: 558-560.
- Poirier P (1892) *Traité d'Anatomie Humaine, Tome Premier*, Paris Ancienne Maison De-lahaye. L. Bataille et Compagnie.
- Quenu E (1907) Du diastasis de l'articulation tibio-peroniere inferieure. *Revue de chirurgie* 36: 82-90.
- Raheem OA and O'Brien M (2011) Anatomical review of the lateral collateral ligaments of the ankle: a cadaveric study. *Anat Sci Int* 86: 189-193.
- Rammelt S, Zwipp H and Grass R (2008) Injuries to the distal tibiofibular syndesmosis: an evidence-based approach to acute and chronic lesions. *Foot Ankle Clin* 13: 611-633, vii-viii.
- Ramsey PL and Hamilton W (1976) Changes in tibiotalar area of contact caused by lateral talar shift. *The Journal of Bone and Joint Surgery Am* 58: 356-357.
- Rein S, Hagert E, Schneiders W, Fieguth A and Zwipp H (2015) Histological analysis of the structural composition of ankle ligaments. *Foot Ankle Int* 36: 211-224.
- Ringleb SI, Dhakal A, Anderson CD, Bawab S and Paranjape R (2011) Effects of lateral ligament sectioning on the stability of the ankle and subtalar joint. *J Orthop Res* 29: 1459-1464.
- Rothenberg A, Gasbarro G, Chlebeck J and Lin A (2017) The Coracoacromial Ligament: Anatomy, Function, and Clinical Significance. *Orthop J Sports Med* 5: 2325967117703398.
- Sarrafián SK (1983) *Anatomy of the Foot and the Ankle: Descriptive, Topographic, Functional*, J.B.Lippincott Company.
- Sauer H-D, Jungfer E and Jungbluth KH (1978) Experimentelle Untersuchung zur Reißfestigkeit des Bandapparats am menschlichen Sprunggelenk. *Hefte der Unfallheilkunde* 131: 37-42.
- Schenk RK (1978) Anatomie des oberen Sprunggelenks. *Hefte der Unfallheilkunde* 131: 1-9.
- Schiebler NTH and Korf H-W (2007) *Anatomie, Histologie, Entwicklungsgeschichte, ma-*

- kroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*, Springer.
- Seiler H (1999) *Das obere Sprunggelenk. Biomechanik und funktionelle Anatomie. Orthopädie* 28: 460-468.
- Shaw HM, Vazquez OT, McGonagle D, Bydder G, Santer RM and Benjamin M (2008) Development of the human Achilles tendon enthesis organ. *J Anat* 213: 718-724.
- Suzuki D, Otsubo H, Watanabe T, Kamiya T, Nagoya S, Yamashita T and Shino K (2015) Ultrastructure of the three anterior cruciate ligament bundles. *Clin Anat* 28: 910-916.
- Taser F, Shafiq Q and Ebraheim NA (2006) Anatomy of lateral ankle ligaments and their relationship to bony landmarks. *Surg Radiol Anat* 28: 391-397.
- Thierfelder KM, Gemescu IN, Weber MA and Meier R (2018) [Injuries of ligaments and tendons of foot and ankle : What every radiologist should know]. *Radiologe* 58: 415-421.
- van den Bekerom MP, Oostra RJ, Alvarez PG and van Dijk CN (2008) The anatomy in relation to injury of the lateral collateral ligaments of the ankle: a current concepts review. *Clin Anat* 21: 619-626.
- Vega J, Malagelada F, Manzanares Cespedes MC and Dalmau-Pastor M (2018) The lateral fibulotalocalcaneal ligament complex: an ankle stabilizing isometric structure. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*: DOI 10.1007/s00167-00018-05188-00168.
- von Recum J, Mayer H, Wendl K, Grützner P and Wetzensen A (2006) Frische Verletzung des OSG. *Trauma Berufskrankh* 8,suppl1: 18-19.
- Waldeyer A (2012) *Waldeyer - Anatomie des Menschen Lehrbuch und Atlas in einem Band*, De Gruyter.
- Wenny R, Duscher D, Meytap E, Weninger P and Hirtler L (2015) Dimensions and attachments of the ankle ligaments: evaluation for ligament reconstruction. *Anat Sci Int* 90: 161-171.
- Williams BT, Ahrberg AB, Goldsmith MT, Campbell KJ, Shirley L, Wijdicks CA, LaPrade RF and Clanton TO (2015) Ankle syndesmosis: a qualitative and quantitative anatomic analysis. *Am J Sports Med* 43: 88-97.
- Wirth CJ, Küssewetter W and Jäger M (1984) Biomechanik und Pathomechanik des oberen Sprunggelenks. *Hefte der Unfallheilkunde* 131: 10-11.
- Xenos MJ and Hopkinson CW (1995) The tibiofibular Syndesmosis. *The journal of bone and joint surgery* 77-A, No.6: 847-856.
- Yildiz S and Yalcin B (2013) The anterior talofibular and calcaneofibular ligaments: an anatomic study. *Surg Radiol Anat.* 35: 511-516.
- Zschäbitz A (2005) Anatomie und Verhalten von Sehnen und Bändern. *Orthopäde* 34: 516-525.
- Zwipp H (1994) *Chirurgie des Fußes*, Wien, Springer.
- Zwipp H (2014) *Tscherne Unfallchirurgie-Fuß*, Springer.