Aus dem Institut für Anatomie I
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. pol. Svenja Caspers

Das Vinculum breve des Daumens als Bestandteil der Propriozeption

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Linus Krüger

2022

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.: Linus Krüger
Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker
Erstgutachter: Prof. Dr. Timm J. Filler
Zweitgutachter: Prof. Dr. Joachim Windolf

Ich widme diese Arbeit meiner Mutter.

Kurzfassung

Als Vinculum breve des Daumens bezeichnet man eine Umschlagsfalte des *Stratum synoviale* der Sehnenscheide des Musculus flexor pollicis longus auf Höhe des distalen Drittels der Phalanx proximalis [4, 14]. Es ist mit der palmaren Platte des Interphalangealgelenkes verbunden und führt Blutgefäße und Nerven zum Hilum der Sehne [4, 5, 7, 48, 58, 66, 72, 106]. Es folgt den Bewegungen der Sehne und stellt ihre Nährstoffversorgung auch bei hohen Gleitamplituden sicher [22].
Ruffini-Körperchen gehören zu den Mechanosensoren [88, 96]. Es handelt sich um langsam adaptierende Dehnungsrezeptoren der tieferen Körperschichten [12, 67]. Sie tragen unter anderem zur Empfindung der propriozeptiven Qualitäten Lage-, Stellungs-, Bewegungs- und Kraftsinn bei [88, 96].
Ein Zusammenhang zwischen dem Vinculum breve und der Registrierung propriozeptiver Qualitäten ist in der Literatur bislang nicht beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Mechanosensoren des Daumens histologisch kartografiert. Ziel war die Darstellung bisher unbekannter Verteilungsmuster der Mechanosensoren des menschlichen Daumens.

Um die Mechanosensoren zur kartografieren wurden histologische Übersichtspräparate fünf zuvor ausgewählter Höhen des Daumens erstellt. Dafür wurden Querschnitte auf Höhe des Carpometacarpal-, Metacarpophalangeal- und Interphalangealgelenkes sowie auf mittlerer Höhe des Os metacarpale I und der Phalanx proximalis an 15 Daumen von 8 formaldehydfixierten Körperspenden präpariert und mit einer Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-Färbung angefärbt. In 13 der 15 Übersichtspräparate auf Höhe des Interphalangealgelenkes konnten auf diese Weise Ruffini-Körperchen innerhalb des stets angeschnittenen Vinculum breve dargestellt werden.
Zur Validierung dieses Ergebnisses wurden daraufhin weitere 16 Daumen von 9 Körperspenden präpariert und das Vinculum breve zur histologischen Untersuchung gezielt entnommen. Unter Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-Färbung zeigten sich hier in 15 von 16 Vincula breve ebenfalls Ruffini-Körperchen.
Als Gesamtergebnis konnten somit in 28 von 31 Vincula breve Ruffini-Körperchen lichtmikroskopisch dargestellt werden.
Im Kontext der Literatur lassen diese Ergebnisse vermuten, dass die dehnungssensitiven Ruffini-Körperchen Auslenkungen des Vinculum breve bei Bewegung des Daumens unmittelbar registrieren können. Diese Arbeit stellt jedoch eine rein morphologische Erfassung der Ruffini-Körperchen dar. Der Beweis, dass sie bei Auslenkungen des Vinculum breve tatsächlich aktiviert werden, könnte anhand einer physiologischen Studie weiter untersucht werden.

Die lichtmikroskopische Darstellung von Ruffini-Körperchen im Vinculum breve des Daumens legt eine Beteiligung des Vinculum breve an der Entstehung propriozeptiver Empfindungen des Daumens nahe. Diese Beobachtung erhöht die Relevanz des Vinculum breve für die reguläre Funktion des Daumens und kann einen neuen Ansatzpunkt sowohl in der operativen Therapie als auch in der Nachbehandlung von Verletzungen oder Krankheiten des Daumens bieten.

Abstract

The vinculum breve of the thumb is characterized as an evagination of the *synovial stratum* of the flexor pollicis longus tendon and located on the distal section of the proximal phalanx [4, 14]. It is attached to the volar plate of the interphalangeal joint and carries blood vessels as well as peripheral nerves towards the hilum of the tendon [4, 5, 7, 48, 58, 66, 72, 106]. Thus, it can follow the tendon‘s motion and ensure its nutrition despite high amplitudes of excursion [22].
Ruffini-corpuscles are counted among the mechanosensory neurons [88, 96]. They are described as slowly adapting strain sensors of the deeper tissue layers and provide proprioceptive information such as the sensation of movement or position [12, 67, 88, 96].

The current literature provides no information on a connection between the vinculum breve and the perception of proprioceptive sensations. In the scope of this work, mechanosensory neurons have been mapped histologically. In addition, the study served to display so far unknown distribution patterns of the mechanosensory neurons within the human thumb.

In order to map the mechanosensory neurons, large histological specimens providing a complete panoramic view of five previously determined levels of the thumb were established. Therefore, cross sections at the height of the carpometacarpal-, metacarpophalangeal- and interphalangeal joint as well as at medium height of the first metacarpal bone and the phalanx proximalis of 15 thumbs taken from a total of 8 formaldehyd-fixed cadavers were prepared and dyed with an Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-dye. 13 of 15 overview-specimens at the height of the interphalangeal joint showed Ruffini-corpuscles within the vinculum breve.
An additional 16 thumbs taken from 9 formaldehyd-fixed cadavers were dissected to gather targeted specimens of the vinculum breve to validate these findings. Dyed with Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-dye Ruffini-corpuscles could be displayed in 15 of those 16 vincula breve. In summary, 28 of all 31 vincula breve examined contained Ruffini-corpuscles.

With regard to current literature, these results suggest that stretch-sensitive Ruffini-corpuscles may sense deflection of the vinculum breve during movement of the thumb. However, this study represents a mere morphological display of Ruffini-corpuscles. To prove their activation during deflection of the vinculum breve, an additional physiological examination would be required.

The histological display of Ruffini-corpuscles within the vinculum breve of the thumb leads to assuming that the vinculum breve takes part in the perception of proprioceptive sensations of the thumb. These findings increase the significance of the vinculum breve for normal movement of the thumb and may serve as a new approach for surgical as well as follow-up treatment of traumatic injury or other disorders of the thumb.

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
ADP	Musculus adductor pollicis
APB	Musculus abductor pollicis brevis
APL	Musculus abductor pollicis longus
C	Celsius
cm	Centimeter
CMC	Articulatio carpometacarpalis I
ElHvG-Färbung	Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-Färbung
EPB	Musculus extensor pollicis brevis
EPL	Musculus extensor pollicis longus
FPB	Musculus flexor pollicis brevis
FPL	Musculus flexor pollicis longus
g	Gramm
h	Stunden
IP	Articulatio interphalangealis
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
MC	Os Metacarpale I
MCPP	Articulatio metacarpophalangealis pollicis
min	Minuten
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Mm.	Musculi
MSP	Muskelspindeln

OPP	Musculus opponens pollicis
PD	Phalanx distalis
PP	Phalanx proximalis
RA	rapidly-adapting
RK	Ruffini-Körperchen
SA	slowly-adapting
SD	Standardabweichung
VPK	Vater-Pacini-Körperchen
µm	Mikrometer

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Übersicht . . . 1
- 1.2 Die Makroanatomie des Daumens . . . 1
  - 1.2.1 Allgemeines . . . 1
  - 1.2.2 Die Sehnenscheide des FPL und die palmare Platte . . . 4
  - 1.2.3 Die Leitungsbahnen des Daumens . . . 5
  - 1.2.4 Die Vincula des Daumens . . . 6
  - 1.2.5 Das Vinculum breve . . . 8
  - 1.2.6 Klinische Relevanz der Vincula . . . 9
- 1.3 Die Propriozeption . . . 10
- 1.4 Die Mechanosensoren . . . 11
  - 1.4.1 Das Ruffini-Körperchen . . . 12
  - 1.4.2 Das Vater-Pacini-Körperchen . . . 15
  - 1.4.3 Die Muskelspindel . . . 15
- 1.5 Ziel der Arbeit . . . 16

2 Material und Methoden **17**
- 2.1 Verwendete Materialien . . . 17
  - 2.1.1 Geräte . . . 17
  - 2.1.2 Chemikalien . . . 17
  - 2.1.3 Software . . . 17
- 2.2 Ethikvotum . . . 18
- 2.3 Die Körperspenden . . . 18
- 2.4 Überblick über die Erstellung der Präparate . . . 19
- 2.5 Erstellung der Übersichtspräparate . . . 20
  - 2.5.1 Erster Präparationsversuch . . . 20
  - 2.5.2 Zweiter Präparationsversuch . . . 21
  - 2.5.3 Endgültige Variante . . . 22
- 2.6 Erstellung der Validierungspräparate . . . 23
- 2.7 Erstellung der histologischen Präparate . . . 24
  - 2.7.1 Übersicht . . . 24
  - 2.7.2 Entwässern, Einbetten und Schneiden . . . 25
  - 2.7.3 Entparaffinieren . . . 26
  - 2.7.4 Färben . . . 26
- 2.8 Methodik der Auswertung . . . 28
  - 2.8.1 Auswertung der Übersichtspräparate . . . 28
  - 2.8.2 Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne der Übersichtspräparate 31
  - 2.8.3 Auswertung der Validierungspräparate . . . 31
  - 2.8.4 Statistik . . . 31
  - 2.8.5 Grafiken . . . 31

3 Ergebnisse **33**
3.1 Übersicht . . . 33
3.2 Ergebnisse der Übersichtspräparate . . . 34
3.2.1 Querschnitt auf Höhe des IP . . . 34
3.2.2 Querschnitt auf mittlerer Höhe der PP . . . 37
3.2.3 Querschnitt auf Höhe des MCPP . . . 39
3.2.4 Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC . . . 41
3.2.5 Querschnitt auf Höhe des CMC . . . 44
3.3 Ergebnisse der Validierungspräparate . . . 46
3.4 Ruffini-Körperchen im Vinculum breve . . . 48
3.4.1 Übersichtspräparate . . . 48
3.4.2 Validierungspräparate . . . 49
3.4.3 Zusammenführung der Ergebnisse und statistische Auswertung . . . 50

4 Diskussion **51**
4.1 Ruffini-Körperchen im Vinculum breve . . . 52
4.1.1 Ruffini-Körperchen und das Vinculum breve im Kontext der Literatur 52
4.1.2 Klinische Relevanz . . . 52
4.2 Diskussion der Methodik . . . 54
4.2.1 Körperspenden . . . 54
4.2.2 Präparation . . . 54
4.2.3 Entkalkung oder manuelle Entfernung der Knochen . . . 56
4.2.4 Färbung . . . 57
4.2.5 Auswertung . . . 57
4.3 Diskussion der Ergebnisse . . . 58
4.3.1 Ergebnisse der Übersichtspräparate . . . 58
4.3.2 Ergebnisse der Validierungspräparate . . . 60
4.3.3 Morphologie des Vinculum breve . . . 61
4.4 Schlussfolgerung . . . 62

Abbildungsverzeichnis **64**

Tabellenverzeichnis **69**

Literaturverzeichnis **71**

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Übersicht

1.2 Die Makroanatomie des Daumens

1.2.1 Allgemeines

Das knöcherne Grundgerüst des Daumens bilden das *Os trapezium*, das *Os metacarpale I* (MC), die *Phalanx proximalis* (PP) und die *Phalanx distalis* (PD) [15]. Zusätzlich finden sich am Daumen *Ossa sesamoidea*, welche unterschiedlich angeordnet sein können (s.u.). *Os trapezium* und MC bilden gemeinsam die *Articulatio carpometacarpalis I* (CMC) [16]. *Os trapezium* und die Basis des MC weisen jeweils konkav/konvexe Gelenkflächen auf, die zueinander „gegensinnig gekrümmt"[16] sind [16]. Damit kann eine Beweglichkeit erreicht werden, die mit der eines Kugelgelenks zu vergleichen ist [80]. Dies wird durch eine lockere Gelenkkapsel unterstützt [16].
MC und PP bilden gemeinsam die *Articulatio metacarpophalangealis pollicis* (MCPP) [16]. Sie verfügt über kräftige Kollateralbänder, welche ihre Beweglichkeit fast vollständig auf die eines Scharniergelenks beschränken, auch wenn die Gelenkflächen morphologisch denen eines Kugel- oder Eigelenks entsprechen [16].
PP und PD bilden schließlich die *Articulatio interphalangealis* (IP). Sie stellt ein reines Scharniergelenk mit kräftigen Kollateralbändern dar und gleicht in ihrem Aufbau bis auf kleine Unterschiede den *Articulationes interphalangeales distales* der Finger 2-5 [16, 81].

Ossa sesamoidae sind in Sehnen eingelagerte Knochen [14]. Sie verlagern den Umlenkpunkt von der Gelenkachse weg und erwirken so einen günstigeren Ansatzwinkel für die entsprechende Sehne [100]. Am Daumen finden sich auf Höhe des MCPP beugeseitig stets zwei *Ossa sesamoidae*, ein radial- und ein ulnarseitiges [53, 89]. Für das IP ist in ca. 74% der Fälle ein einzelnes *Os sesamoideum* beschrieben [52].

Der Daumen wird durch vier Muskeln des Unterarms und durch ebenfalls vier kurze Handmuskeln bewegt.
Vom Unterarm ausgehend verlaufen beugeseitig der *Musculus (M.) flexor pollicis longus* (FPL) sowie streckseitig die *Musculi (Mm.) abductor pollicis longus* (APL), *extensor pollicis longus* (EPL) und *extensor pollicis brevis* (EPB) [17].
Der FPL entspringt beugeseitig nahe der *Tuberositas radii* und der *Membrana interossea antebrachii* dieser Höhe [17]. Seine Sehne verläuft nach distal durch den Karpaltunnel und

die Thenarmuskulatur und setzt schließlich an der beugeseitigen Basis des PD an [17]. Er kann eine Beugung in IP, MCPP und CMC durchführen und ist an der Oppositionsbewegung beteiligt [17, 90]. Er ist der einzige Beuger im IP [18, 59].
Der APL und der EPB entspringen streckseitig auf proximaler bis mittlerer Höhe des *Corpus ulnae* und des *Corpus radii* sowie der *Membrana interossea antebrachii* dieser Höhe [17]. Sie verlaufen gemeinsam durch das 1. Strecksehnenfach [17]. Der APL zeigt dabei einen sehr variablen Ansatz, wobei der Ansatz seiner Sehne an der Basis des MC und einer zusätzlichen Sehne am *Os trapezium* die häufigste Variante darstellt [82]. Er führt eine Abduktion im CMC durch [17]. Der EPB setzt an der streckseitigen Basis der PP an [17]. Er bewirkt eine Extension im MCPP und CMC [90].
Der EPL entspringt dorsalseitig mittig des *Corpus ulnae* und der *Membrana interossea antebrachii* [17]. Seine Sehne verläuft durch das 3. Strecksehnenfach und anschließend schräg nach radial zum Daumen, wo er an der Basis des PD ansetzt [17]. Er bewirkt eine Streckung im IP und MCPP und kann zusätzlich, aufgrund seines schrägen Verlaufs über den Handrücken, zur Adduktionsbewegung des Daumens beitragen [17].

Zu den für die Bewegung des Daumens relevanten kurzen Handmuskeln gehören die jeweils zweiköpfigen Mm. flexor pollicis brevis (FPB) und adductor pollicis (ADP), des weiteren der M. abductor pollicis brevis (APB) und M. opponens pollicis (OPP) [18, 89]. Ihr Ansatz, Ursprung und ihre Funktion werden zur besseren Übersicht in der nachfolgenden Tabelle 1.1 aufgeführt.

Die Dorsalaponeurose eines Fingers stellt eine streckseitig gelegene Sehnenplatte dar, die sich hauptsächlich aus den langen Sehnen der entsprechenden, am Unterarm entspringenden, Extensoren vereint [18].
In die Dorsalaponeurose des Daumens strahlen auf Höhe des MCPP zudem die in Tabelle 1.1 dargestellten Thenarmuskeln ein und bilden dort eine „Haube“ [82]. Seine Dorsalaponeurose erstreckt sich entsprechend der Ansätze von EPB und EPL vom MCPP bis zur Basis des PD, von wo aus sie noch Verbindungsfasern zur Nagelmatrix abgibt [82]. Sie ist an ihrer palmarseite stellenweise mit dem *Periost* von PP und PD verbunden [8]. Über diese lockeren Verbindungen treten Gefäße und Nerven in die Aponeurose über, sodass die Verbindungen in diesem Kontext mit den in Unterabschnitt 1.2.4 geschilderten *Vincula* der Beugesehnen verglichen werden können [8].

	M. flexor pollicis brevis	**M. abductor pollicis brevis**	**M. adductor pollicis**	**M. opponens pollicis**
Ursprung	-Caput superficiale: Retinaculum flexorum -Caput profundum: Os capitatum Os trapezium	-Retinaculum flexorum -Eminentia carpi radialis -Os trapezium -Sehne des APL	-Caput transversum: Hohlhandseite Os metacarpale III -Caput obliquum: -Os capitatum -Basis der Ossa metacarpalia II,III und IV	-Retinaculum flexorum -Eminentia carpi radialis
Ansatz	-radiales Sesambein des MCPP -Dorsalaponeurose	-Basis des PP -radiales Sesambein des MCPP -Dorsalaponeurose	-ulnares Sesambein des MCPP -Dorsalaponeurose -Sehnenscheide des FPL über PP	-Radialkante des MC
Bewegung CMC	-Caput superficiale: Abduktion -Caput profundum: Adduktion	Radialabduktion	-Caput transversum: Adduktion/Flexion -Caput obliquum: Adduktion	-Innenrotation/Opposition -Flexion
Bewegung MCPP	Beugung	-Radialabduktion Extension	-Caput transversum: Flexion -Caput obliquum: Flexion	-
Bewegung IP	Streckung	-	-Caput transversum: Streckung	-

Tabelle 1.1: Übersicht über die Muskeln des Thenars, abgeleitet aus: Benninghoff, Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem, Band 1, 17. Auflage 2008 [18]. Die verwendeten Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen.

1.2.2 Die Sehnenscheide des FPL und die palmare Platte

Im anatomischen Standardwerk „Benninghoff“ werden Sehnenscheiden als „schlauchförmige Bursen, die die Sehne vollständig umhüllen“ [14] beschrieben [14]. Ihre Wand besteht aus zwei Schichten, dem *Stratum fibrosum* und dem *Stratum synoviale* [14]. Die Sehnenscheide des FPL erstreckt sich vom distalen Radius über eine Strecke von 12-14cm bis zur PD [82]. Sie wird im *Stratum fibrosum* von drei Faserzügen verstärkt [82].
Der am weitesten proximal gelegene Faserzug findet sich auf Höhe des MCPP und wird als A1 bezeichnet [31, 89]. Der am weitesten distal gelegene befindet sich nahe der Ansatzstelle des FPL und wird als A2 bezeichnet [31, 89]. Beide zusammen stellen die Ringbänder des Daumens dar [82]. Im englischen Sprachgebrauch werden sie auch als *„annular pulleys“* bezeichnet [31].
Im Gegensatz dazu wird der dritte Verstärkungszug *„oblique pulley“* genannt [31]. H.M. Schmidt und U. Lanz bezeichnen es im deutschen als „Y-förmigen Verstärkungskomplex“ und unterscheiden eine proximale *„Pars anularis“* von einer distalen *„Pars obliqua“* [82]. Der *oblique pulley* erstreckt sich schräg nach distal ausgehend von der ulnaren Seite der PP nahe ihrer Basis bis zur radialen Seite der PP nahe ihres Köpfchens [31]. Sein proximaler Anteil ist dabei verbunden mit einem Teil der Ansatzsehne des ADP [31].
Der *oblique pulley* ist nach Doyle und Blythe (1977) der wichtigste Bestandteil zum Erhalt der Funktion des FPL [31]. Während die isolierte Durchtrennung des A1 (z.B. im Zuge operativer Therapie bei Tendovaginitis stenosans) keine Veränderung der Beweglichkeit des Daumens zur Folge habe, führe die zeitgleiche Druchtrennung des A1 und des *oblique pulley* zu einer eingeschränkten Flexion im IP bei gleichzeitig gesteigerter Flexion im MCPP [31, 107]. Zissimos et al. (1994) sehen hingegen keinen signifikanten Unterschied in der Beweglichkeit von IP und MCPP, wenn entweder nur A1 oder nur der *oblique pulley* isoliert durchtrennt werden, sodass hier beiden Verstärkungszügen der gleiche Stellenwert zugeschrieben wird [107]. Zu diesem Ergebnis kommen auch Esplin et al. (1996) [33].

Als palmare Platte bezeichnet man eine beugeseitige „Hilfseinrichtung der Fingergelenke“ [83]. Die palmaren Platten setzen sich aus faserknorpeligen und bindegwebigen Anteilen zusammen [83]. Sie dienen als Vergrößerung der Gelenkpfannen im Sinne einer Gelenklippe [83]. Sie vergrößern in Extension den Abstand der langen Beugesehne zur Beugeachse und ermöglichen somit „günstigere Hebelverhältnisse für die erste Phase der Beugung“ [83].
Am Daumen stehen sie auf Höhe des MCPP und IP mit den Ringbändern A1 und A2 in Verbindung [31]. Es finden sich Unterschiede der jeweiligen palmaren Platten des Daumens und der Finger 2-5: Die palmare Platte über dem IP ist dicker ausgebildet als die der vergleichbaren *Articulationes interphalangeales distales* der Finger 2-5 [81]. Über dem MCPP sind stets die *Ossa sesamoidea* in die palmare Platte und die Gelenkkapsel eingelagert [84]. Sie ist hier kürzer und breiter als an den *Articulationes metacarpophalangeales* der Finger 2-5 [84].

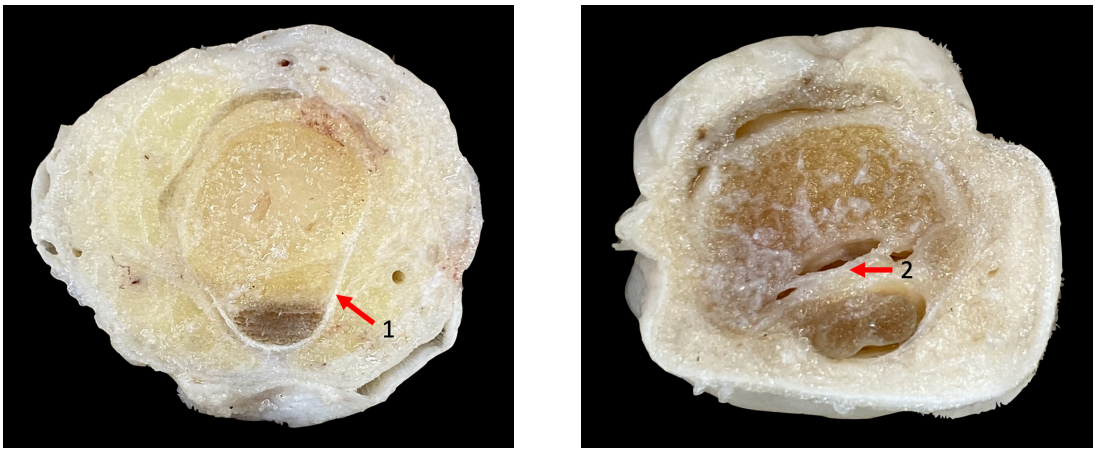


Abbildung 1.1: Querschnitte auf mittlerer Höhe des PP (links) und auf Höhe des IP (rechts). 1 = *„oblique pulley“*, 2 = palmare Platte unterhalb des Köpfchens des PP

1.2.3 Die Leitungsbahnen des Daumens

Die Blutversorgung des Unterarms und der Hand wird durch die *Arteria (A.) radialis* und die *A. ulnaris* gewährleistet, welche sich auf Höhe des Ellenbogens aus der *A. brachialis* aufteilen [102]. Sie bilden an der Hohlhand zwei Gefäßbögen, den *Arcus palmaris profundus* und den *Arcus palmaris superficialis* [102]. Nachfolgend werden nur die für die Versorgung des Daumens notwendigen Arterien aufgeführt.
Die *A. radialis* zieht auf Höhe des Handgelenks von der palmaren Seite des distalen Radius nach dorsal und unterkreuzt hier die Sehnen des APL, EPB und EPL [60, 91]. Sie tritt anschließend durch den *M. interosseus dorsalis I* wieder nach palmar und vereinigt sich hier mit dem *Ramus palmaris profundus* der *A. ulnaris* zum *Arcus palmaris profundus* [91, 102].
Zwischen den Sehnen von APL, EPB und EPL, auf Handgelenkshöhe im Bereich der sogenannten *Tabatière*, gibt die *A. radialis* in 70% der Fälle die *A. radiodorsalis pollicis* ab [17, 32, 85]. Diese zieht dann am APB entlang Richtung PD [85]. In 30% der Fälle fehlt sie jedoch [32].
Kurz vor dem Durchtritt durch den *M. interosseus dorsalis I* gibt die *A. radialis* die *A. metacarpalis dorsalis I* ab [91]. Aus ihr entspringt in 30% der Fälle die *A. ulnodorsalis pollicis*, welche aber auch zu je 30% direkt aus der *A. radialis* stammen oder gänzlich fehlen kann [32]. Die *A. ulnodorsalis pollicis* kann jedoch auch aus der *A. princeps pollicis* entspringen [73].
Nachdem die *A. radialis* durch den *M. interosseus dorsalis I* wieder nach palmar getreten ist, gibt sie die *A. princeps pollicis* ab [91]. Die *A. princeps pollicis* verläuft dann an der palmarseite des MC nach distal und teilt sich auf Höhe der Basis des PP in 2 Äste auf [91]. Sie liegt dabei dorsal der Sehne des FPL [91]. Die beiden Äste werden als *A. radiopalmaris pollicis* und *A. ulnopalmaris pollicis* bezeichnet [85]. Beide stehen über den digitopalmaren Bogen auf mittlerer Höhe der PP und zudem über eine distale Arkade an der Fingerbeere in Verbindung [85].
Aus dem digitopalmaren Bogen führen arterielle Äste über das *Vinculum breve* (s. Unterabschnitt 1.2.5) zur Sehne des FPL [85].
Die Venen der Hand werden in oberflächliche und tiefe Venen unterteilt [91]. Dabei formen

die tiefen Venen der Hand ebenfalls eine oberflächlichen und einen tiefen Hohlhandbogen, wobei sie gemeinsam mit den korrespondierenden Arterien verlaufen [91].
Analog zu den Arterien lassen sich am Daumen auch zwei dorsale und zwei palmare Nerven unterscheiden, die *Nervi digitales palmares (proprii) et dorsales* [61, 103]. Die *Nervi digitales palmares proprii* gehen als Endäste aus dem *Nervus medianus* hervor, der sich nach seinem Austritt aus dem Karpaltunnel noch zunächst in die *Nervi digitales palmares communes* aufteilt [103]. Sie innervieren die palmare Fläche des Daumens sowie den distalen Bereich der dorsalen Fläche sensorisch [103].
Die *Nervi digitales dorsales* gehen aus dem *Ramus superficialis* des *Nervus radialis* hervor [103]. Sie versorgen die verbleibende dorsale Fläche des Daumens sensorisch [103].

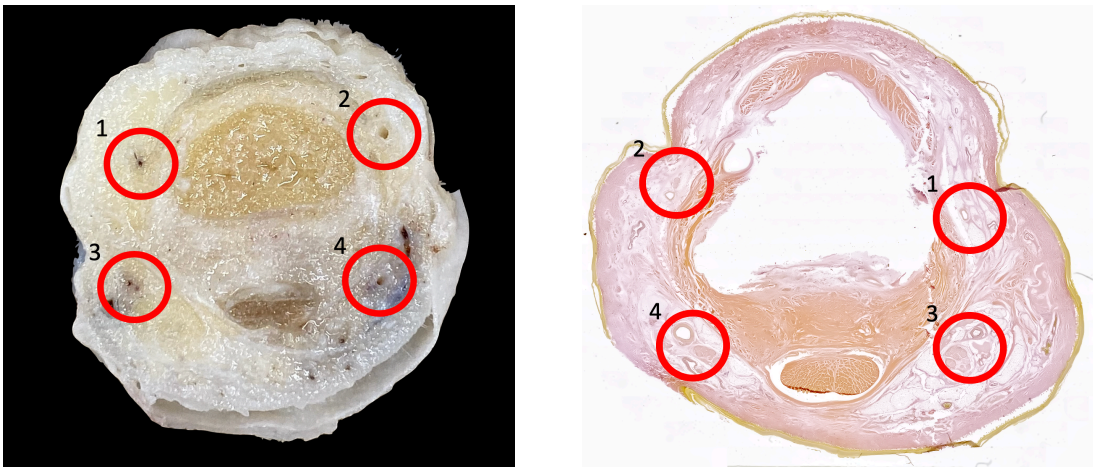


Abbildung 1.2: Die Bilder zeigen Querschnitte eines linken Daumens (linkes Bild) und eines rechten Daumens (rechtes Bild) auf Höhe des IP. Ansicht jeweils von proximal. 1 = *A. ulnodorsalis pollicis*, 2 = *A. radiodorsalis pollicis*, 3 = *A. ulnopalmaris pollicis*, 4 = *A. radiopalmaris pollicis*. Im rechten Bild (ElHvG-Färbung) ist der gemeinsame Verlauf der Arterien mit den *Nervi digitales palmares proprii et dorsales* gut zu erkennen.

1.2.4 Die Vincula des Daumens

Sehnen bestehen aus straffem Bindegewebe, in dem die Kollagenfasern parallel angeordnet sind [19, 62]. Eingebettet in die Fasern liegen die *Fibroblasten* [19]. Diese ragen mit ihren Fortsätzen zwischen die Fasern und setzen unter anderem die Bestandteile der Kollagenfasern zusammen [19, 20] und bauen sie ab [63]. Bei „stark verminderter Syntheseleistung“ [20] werden sie *Fibrozyten* genannt [20]. In Sehnen werden sie wegen ihrer Fortsätze auch *Pterygozyten* oder *Tendozyten* genannt [101].
Sehnen sind von lockerem Bindegewebe ummantelt, dem *Epitendineum* [19, 62]. Im *Epitendineum* verlaufen Blutgefäße und Nerven und ziehen in Septen nach innen [19, 62]. Die Septen werden als *Peritendineum* bezeichnet [19, 62].
Die durchschnittliche Gleitamplitude der Sehne des FPL über der PP beträgt bei Flexion im IP 10,92mm [22]. Über dem MC beträgt die mittlere Gleitamplitude bei Flexion im IP ebenfalls 10,92mm und bei Flexion im MCPP 7,68mm, insgesamt also 19,6mm [22].
Um den Bewegungen der Beugesehnen der Finger folgen zu können bedarf es somit einer flexiblen Struktur, die Blutgefäße und Nerven zur Sehne führen und somit u.a. die für den Stoffwechsel der *Fibroblasten* notwendige Versorgung mit Nährstoffen auch bei großer

Beweglichkeit sicherstellen kann.

Diese Aufgabe übernehmen die *Vincula* [4, 5, 7, 48, 58, 66, 72, 106].
Als Vinculum bezeichnet man eine Falte des *Stratum synoviale* der Sehnenscheide, die zum Hilum der Sehne führt (s. Abbildung 1.3) [14]. An ihrem Umschlagspunkt finden sich oftmals Zotten, die *Villi synoviales* [14]. Vincula kommen nicht nur an den langen Beugesehnen der Hand vor, sondern können auch an anderen langen Sehnen des Körpers gefunden werden [51]. So beschreiben z.B. Johnson et al. (1992) das Vinculum der langen Bizepssehne [51].
Die Nomenklatur der Vincula der Hand ist nicht eindeutig. In der Literatur findet stattdessen auch der Begriff *„Mesotendineum“* Verwendung [106]. So unterscheiden Zbrodowski et al. (1981) ein karpales, metakarpales und phalangeales Mesotendineum voneinander [106]. Zumeist werden jedoch, entsprechend ihrer Morphologie, die kurzen und breiteren Vincula als *Vinculum breve* und die schmaleren und längeren Vincula als *Vinculum longum* bezeichnet [4, 5]. Hergenroeder et al. (1982) unterscheiden das (metacarpale) Mesotendineum von den Vincula dahingehend, dass die Falte der Sehnenscheide als Mesotendon von palmar an die FPL-Sehne herantritt, als Vinculum jedoch von dorsal, und somit von der dem Knochen zugewandten Seite [48]. Armenta et al. (1980) beschreiben an den Fingern 2-5 ein Vinculum longum und breve jeweils über der proximalen und über der medialen Phalanx und kennzeichnen diese von proximal nach distal als V1-4 [5]. Armenta et al. (1984) sprechen am Daumen schließlich vom Vinculum breve analog zu dem Vinculum in V2-Position der Finger [4].
Nachfolgend werden die Beschreibungen „Vinculum breve“ entsprechend Armenta et al. (1984) und „metacarpales Mesotendineum“ entprechend Hergenroeder et al. (1982) [4, 48] verwendet. Die von Armenta et al. (1980) als „Vinculum longum“ bezeichneten Strukturen finden nachfolgend einzeln keine Erwähnung mehr [5]. Für die Gesamtheit dieser Strukturen an einem Daumen wird in dieser Arbeit der Oberbegriff „Mesotendineum“ verwendet werden.
Da in dieser Arbeit das Vinculum breve des Daumens von vorrangiger Bedeutung ist, wird es in Unterabschnitt 1.2.5 gesondert beschrieben.

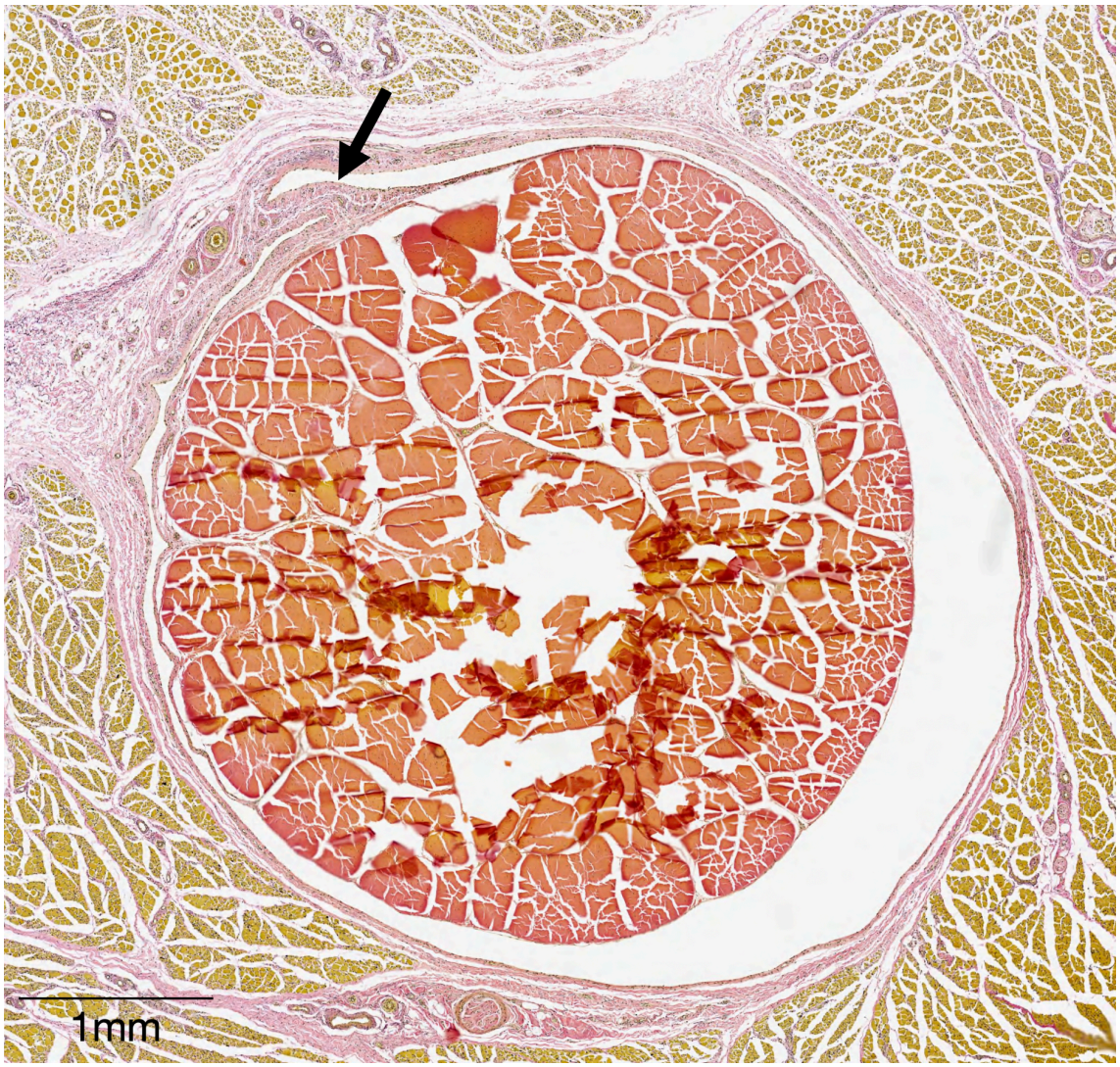


Abbildung 1.3: Der Pfeil markiert den Anschnitt des metacarpalen Mesotendineums in einem Querschnittspräparat auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens. Es tritt von palmar an das Hilum der FPL-Sehne heran. ElHvG-Färbung.

1.2.5 Das Vinculum breve

Das Vinculum breve des Daumens befindet sich im distalen Drittel der PP und verläuft über die palmare Platte des IP, mit der es verbunden ist [4]. In ca. 82% der Fälle setzt es sich weiter nach distal bis zum Ansatz der FPL Sehne an der Basis der PD fort [4]. In der Literatur wurde es bei jedem untersuchten Daumen vorgefunden [4, 7].
Das Vinculum breve führt die aus dem digitopalmaren Bogen kommenden Äste der A. radiopalmaris pollicis und A. ulnopalmaris pollicis zur Sehne des FPL (s. Unterabschnitt 1.2.3) [7, 85]. Armenta et al. (1984) vergleichen seine Form mit einem *„truncated cone“*, also einem gekürzten Kegel [4]. Dabei setzt seine schmalere Seite an der dorsalen Seite der FPL-Sehne an und die breitere Seite geht aus der Sehnenscheide hervor [4]. Die durchschnittliche Größe wird wie folgt beschrieben: Länge des Ansatzes an der FPL-Sehne 17,7 (+- 4mm) Standardabweichung (SD) von proximal nach distal, Ansatz an der dem Knochen zugewandten Seite 19 (+- 4,7mm SD) von proximal nach distal, Höhe des bei Zug an der Sehne nach palmar maximal erreichbaren Abstands zwischen den Ansatzstellen des

Vinculum breve an der FPL-Sehne und an der dem Knochen zugewandten Seite 15,5 (+-3,6mm SD) [4].

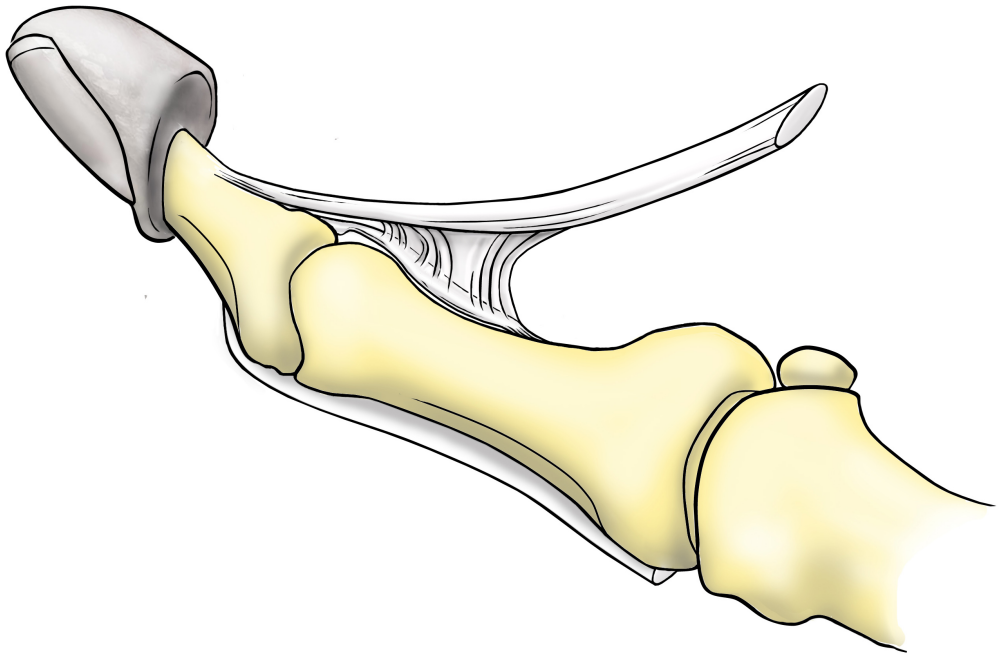


Abbildung 1.4: Vinculum breve eines linken Daumens über der PP. Es ist an der dem Knochen zugewandten Seite mit der palmaren Platte verbunden und führt zum Hilum der Sehne.

1.2.6 Klinische Relevanz der Vincula

Eine Flexion im IP ist trotz ansatznah durchtrennter FPL-Sehne bei intaktem Vinculum breve noch möglich [4]. Dies gelingt über den Zug an der palmaren Platte, mit der es verwachsen ist [4]. Da so jedoch lediglich eine schwache Flexion erreicht werden kann, bedarf es zur Diagnosesicherung bei fraglicher Verletzung der FPL-Sehne stets dem Gegendruck auf die PD durch den Untersucher [4]. Die Untersuchung sollte nach Aussage des Autors jedoch nicht mehrfach wiederholt werden, da sie eine vollständige Lazeration des Vinculums verursachen kann [4].
Amadio et al. (1985) haben bei Beugesehnenverletzungen in Zone 2 ein signifikant schlechteres postoperatives Outcome (gemessen an der *total active motion* der Finger) nach Sehnennaht nachgewiesen, wenn die Vincula im Zuge des Traumas ebenfalls durchtrennt wurden [3]. Als Ursache wird hierbei u.a. die vermutlich bessere Nährstoffversorgung bei intakten Vincula angeführt [3]. Als weitere Gründe diskutiert der Autor z.B. die unterschiedliche schwere des ursprünglichen Traumas oder die notwendigerweise größere chirurgische Invasivität bei der Naht stark retrahierter Beugesehnen und dabei gerissenen Vinculae [3].

1.3 Die Propriozeption

Die Propriozeption, auch Tiefensensibilität genannt, ist neben der Oberflächensensibilität und der visceralen Sensibilität ein Teil der Somatosensibilität [88]. Sie umfasst die Qualitäten Lagesinn, Stellungssinn, Bewegungssinn und Kraftsinn [88]. Die ersten Beschreibungen der Propriozeption sind in den Arbeiten von Ernst Heinrich Weber, „Tastsinn und Gemeingefühl“ (1846) und Charles Bell, *„On the nervous circle which connects the voluntary muscles with the brain“* (1826) zu sehen.
Auf deren Grundlage formulierte Henry Charlton Bastian 1887 zusammenfassend den Begriff der *„Kinesthesis“* [10]. Zu *Kinesthesis* zählte Bastian von der Haut, der Muskulatur und anderen tiefen Geweben der Extremitäten wie Faszien, Sehnen und Gelenkoberflächen kommende Emfpindungen [10]. Die Summe dieser Empfindungen ermögliche uns, „die Postition und Bewegung der Extremitäten im Raum zu erfahren und zwischen verschiedenen Stufen von Widerstand und Gewicht zu unterscheiden“ [10].
Der heute gebräuchliche Begriff „proprioception“ wurde schließlich 1906 von Charles Sherrington geprägt [86].
Auf die an der Propriozeption beteiligten Strukturen des zentralen Nervensystems wird nachfolgend nicht eingegangen.

Neuere Veröffentlichungen befassen sich auch mit den klinischen Aspekten der Propriozeption. Bändern an Gelenken wird, neben ihrer Funktion als passive, mechanischen Stabilisatoren, eine immer größere Bedeutung als senorische Strukturen zugeschrieben, die entscheidenden Beitrag zur aktiven, dynamischen Stabilisierung von Gelenken leisten. [9, 40, 50]. Folglich kann es bei Verletzung oder Krankheiten dieser Hilfseinrichtungen der Gelenke auch zu einer Einschränkung der Sensorik im entsprechenden Gelenk kommen [9, 87, 96].
In diesem Kontext untersuchten Smith und Brunolli (1989) Probanden mit anamnestisch gesunden Glenohumeralgelenken im Vergleich zu solchen mit stattgehabten unilateralen vorderen Schulterluxationen. Erhoben wurde dabei erstens die Genauigkeit, mit der ein vorher gezeigter Winkel reproduziert werden kann, zweitens die Schwelle, ab der eine passive Bewegung registriert wird und drittens die Genauigkeit der Reproduktion eines zuvor gezeigten Winkels in endgradiger Außenrotation [87]. Die erreichten Werte der Schultern mit stattgehabter Luxation fielen dabei signifikant schlechter aus [87]. Die Autoren vermuten auf Basis der Ergebnisse eine posttraumatisch veränderte neuromuskuläre Koordination, welche auch als Ursache des erhöhten Risikos für erneute Luxationen nach erstmalig stattgehabter Schulterluxation gesehen werden könne [87].
Barrack et al. (1989) haben gezeigt, dass Patienten mit einem vollständig rupturierten vorderen Kreuzband eine signifikant höhere Detektionsschwelle bei passiver Bewegung des entsprechenden Knies im Vergleich zum gesunden Knie aufweisen [9]. Beard et al. (1993) sahen sogar die Möglichkeit, objektiv messbare Einschränkung der propriozeptiven Fähigkeiten des Knies zu nutzen, um objektive Kriterien für die Indikationsstellung zur Rekonstruktion eines defizenten vorderen Kreuzbandes zu schaffen [11].
Klinische Testverfahren zur objektivierten Messung von Propriozeption sind in der Literatur vielfach beschrieben und bewertet worden [27, 46, 79, 87, 96].
Diese finden u.a. auch Anwendung in der Sportmedizin. Han et al. (2015) beschreiben,

dass die Schärfe der propriozeptiven Wahrnehmung signifikant mit dem Leistungsniveau bei Profisportlern korreliert [47]. Dazu deutet der Autor an, dass die überhaupt durch Training erreichbare Verbesserung der Schärfe der propriozeptiven Wahrnehmung eines Sportlers durch die eigenen biologischen Vorraussetzungen begrenzt sein könnte [47].
Cabuk et al. (2017) vermuten eine Prädisposition zur Kniegelenksarthrose bei geringerem Besatz an Mechanosensoren im Kapsel/-Bandapparat des Knies [24].
Die propriozeptiven Eigenschaften der Finger wurde von Clark et al. (1986) sowie Taylor und McCloskey (1990) beschrieben [26, 97].

1.4 Die Mechanosensoren

Die Propriozeption umfasst die Qualitäten Lage-, Stellungs-, Bewegungs- und Kraftsinn (s. Abschnitt 1.3) [88]. Die dazu gehörenden Reize werden von Mechanosensoren registriert [88]. Ein Mechanosenor ist eine spezialisierte Nervenendigung. Er wandelt einen mechanischen Reiz in ein Rezeptorpotential um. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Transduktion* [88]. Dabei ist ein Sensor jeweils spezifisch für eine bestimmte Art des Reizes [88]. Jedoch kann ein Mechanosensor sowohl Teil der Tiefensensibilität als auch der Oberflächensensibilität sein.
Als Beispiel dafür soll ein dehnungsempfindliches Ruffini-Körperchen (s. Unterabschnitt 1.4.1), das palmar in der Dermis über dem IP liegt, dienen. Es kann zum einen als Bestandteil des Tastsinns (Teil der Oberflächensensibilität) fungieren und Aufschluss über die Form eines Gegenstandstands geben, wenn man den Gegenstand berührt und dieser dabei die Haut entsprechend verformt [88]. Zum anderen dient es aber als Propriozeptor (Tiefensensibilität), wenn er die Spannung der Haut registriert, die bei Bewegung über dem Gelenk entsteht [88].

Zu den Mechanosensoren des propriozeptiven System gehören Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken sowie kutane Rezeptoren [88, 96]. Unter erstere fallen Muskelspindeln, Golgi-Sehnenorgane sowie schnell oder langsam adaptierende (s.u.) Mechanorezeptoren der Gelenkkapseln [88, 96]. Zu letzteren werden in erster Linie dehnungsempfindliche Mechanorezeptoren der Haut, z.B. Ruffini-Körperchen, die bei Anspannung der Haut über den Gelenken aktiviert werden, gezählt [88, 96]. Eine propriozeptive Empfindung ist also in der Regel hergeleitet aus verschiedenen Signalen der Rezeptoren in Muskeln, Sehnen, Gelenken und der Haut [96].

Die Mechanosensoren lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten weiter klassifizieren. Der überwiegende Anteil der nachfolgend erwähnten Publikationen beruft sich auf die Charakterisierung der Nervenendigungen durch Freeman und Wyke (1967). Freeman und Wyke haben die Nervenendigungen im Bandapparat des Kniegelenks der Katze nach primär morphologischen Aspekten in 4 Arten (1. globulär oder ovoid, 2. zylindrisch oder konisch, 3. fusiform, 4. unmyelinisiert) eingeteilt [35]. Die dazugehörigen Einzelheiten werden in Unterabschnitt 1.4.1 aufgeführt und sind in Tabelle 1.2 abgebildet.
In den Physiologie-Standardwerken werden Mechanosensoren in erster Linie nach Geschwindigkeit der *„Adaptation“* unterschieden [88]. *Adaptation* ist definiert als „Empfindlichkeitsverlust bei Fortdauer des Reizes“ [88]. Abgegrenzt werden dabei *„slowly-adapting“*

(SA)-Rezeptoren von *„rapidly-adapting“* (RA)-Rezeptoren [88]. Dies bedeutet, dass ein über längere Zeit gleichbleibender Reiz bei RA-Rezeptoren ein im Verhältnis kürzeres Rezeptorpotential auslöst als bei SA-Rezeptoren, die RA-Rezeptoren bei gleichem Reiz also früher nicht mehr aktiviert werden.
Kutane Mechanosensoren können des Weiteren abhängig von ihrer Lage in der Haut eingeteilt werden [88]. Dabei werden die in den oberflächlichen Schichten liegenden Sensoren (Typ 1) von denen in tieferen Schichten (Typ 2) unterschieden [88].
Für diese Arbeit sind in erster Linie die Ruffini-Körperchen von Bedeutung. Vater-Pacini-Körperchen und Muskelspindeln werden daher nachfolgend nur kurz erläutert.

1.4.1 Das Ruffini-Körperchen

Der Name der Ruffini-Körperchen (RK) geht auf ihren Erstbeschreiber Angelo Ruffini zurück, der sie u.a. in seiner 1894 verfassten Arbeit *„Sur un nouvel Organe nerveux terminal et sur la présence des corpuscules Golgi-Mazzoni dans le conjonctif sous-cutané de la pulpe des doigts de l'homme.“* beschreibt. Es handelt sich um langsam adaptierende Dehnungsrezeptoren, die in tieferen Körperschichten zu finden sind [12, 67]. Sie können daher als SA-2-Rezeptoren gekennzeichnet werden [12, 98].

Halata et al. (1985) schreiben der Morpholgie der RK eine große Variabiliät zu. Sie unterscheiden drei verschiedene Typen anhand von Besipielen aus der Gelenkkapsel des menschlichen Knies [45]:

- kleine RK ohne Kapsel
- RK mit einer Kapsel bestehend aus dem umliegenden Gewebe
- RK mit einer vollständigen oder unvollständigen Perineuralkapsel

Die RK werden an ihren offenen Enden von den Kollagenfasern des umliegenden Gewebes durchzogen und sind so mit ihrer Umgebung verbunden [12]. Je eher die Kollagenfasern gleich ausgerichtet sind, desto wahrscheinlicher weisen die RK eine Kapsel auf und umgekehrt [12, 45]. Die Morphologie der RK ist also vor allem abhängig vom umliegenden Gewebe [45]. Die feste Verbindung zu ihrer Umgebung trägt zu ihrer Funktion als Dehnungssensoren bei [37].
Große RK sind häufig verzweigt und bestehen aus mehreren Zylindern, wobei die einzelnen Zylinder innerhalb eines Körperchens in die Kollagenfasern eingelagert und an dessen Faserverlauf ausgerichtet sind [41, 43, 45]. Die Zylinder können durch eine Kapsel aus *Fibroblasten* oder durch eine unvollständige Perineuralkapsel verbunden sein [45]. Zwischen den Zylindern sind regelhaft Blutgefäße eingelagert, welche sowohl zur Versorgung mit Nährstoffen als auch als Puffer der Zylinder untereinander dienen können [45]. Das abgehende Axon ist myelinisiert und weist einen Durchmesser von 2-4 Mikrometern (µm) auf [45].

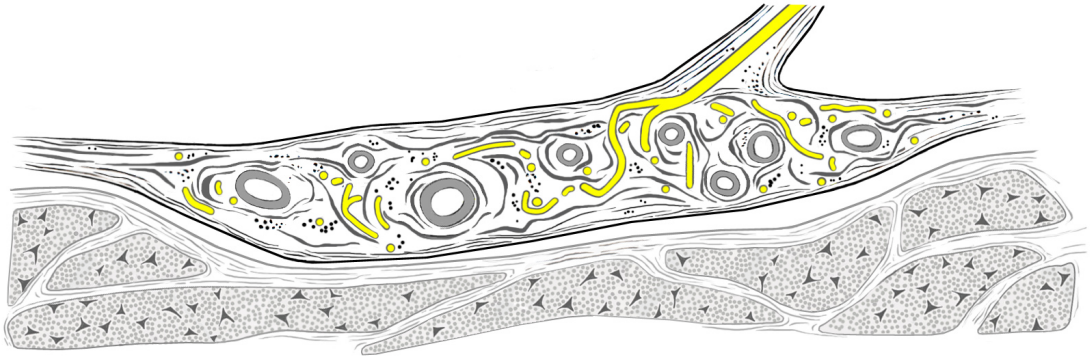


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung eines Ruffini-Körperchens in unmittelbarer Lagebeziehung zu einer Sehne.

Der Großteil der Publikationen, die sich mit RK und anderen Nervenendigungen der Propriozeption befassen, berufen sich auf die Charakterisierung der Sensoren von Freeman und Wyke (1967). Neben der Einteilung nach ihrer Morphologie (s. Abschnitt 1.4) werden die durchschnittliche Größe, die jeweilige Lokalisation, der Durchmesser der zugehörigen Nervenfaser und die jeweiligen funktionellen Eigenschaften zur Klassifizierung berücksichtigt [35]. RK gehören hierbei zu den Typ I Nervenendigungen [35]. Die Charakteristica der Typ I Nervenendigungen nach Freeman und Wyke sind übersichtshalber in Tabelle 1.2 aufgeführt.

Typ	I
Morphologie	Globuläres oder ovoides Körperchen. Dünne Kapsel aus 1-2 Schichten. Baumartig verzweigte Nervenenden. Zu Gruppen von 3-6 Körperchen vernetzt.
Durchschnittliche Größe (µm)	100 x 40
Lokalisierung	*Stratum fibrosum* der Gelenkkapsel. Extrinsische Bänder des Gelenks. Im paraartikulären Periost. In gelenknahen Bändern.
Durchmesser der zugehörigen Nervenfaser (µm)	5-8 (wenig myelinisiert)
funktionelle Eigenschaften	Mechanorezeptor, afferent, langsam adaptierend, geringe Reizschwelle

Tabelle 1.2: Charakteristika der Typ I - Nervenendigungen nach Freeman und Wyke (1967), zu denen das RK gehört [35]. Als Grundlage dient das Kniegelenk der Katze.

Als typische Lokalisationen der RK werden im anatomischen Standardwerk „Benninghoff Anatomie“ das *Stratum reticulare* der Haut, das *Stratum fibrosum* der Gelenkkapseln und das *Periodontium* der Zähne genannt [12]. Zahlreiche Publikationen geben jedoch genaueren Aufschluss über ihre Verteilung.

So beschrieb Boyd (1954) RK im *Stratum fibrosum* der Gelenkkapsel des Knies an Katzen als langsam adaptierende *„sensory units of spray type“* [21]. Im *Stratum fibrosum* der Gelenkkapsel des menschlichen Knies wurden RK später von Halata et al. (1985) beschrieben [45]. Auch Johansson (1991), Del Valle et al. (1998) und Cabuk et al. (2016) beschreiben RK in den Bändern des Kniegelenks [23, 30, 50]. Im Kontext der unteren Extremität zeigen Stecco et al. (2013) RK in der Plantarfaszie [93]. In der Arbeit von Moraes et al. (2008) werden RK im lateralen Bandapparat des Sprunggelenks, sowie von Rein et al (2013) und Rein et al. (2014) im lateralen und medialen Bandapparat, dem vorderen tibiofibularen Band der Syndesmose und dem Bereich des *Sinus tarsi* aufgeführt [69, 75, 76]. Im *Stratum Synoviale* des *Sinus tarsi* wurden RK von Akiyama et al. bereits 1999 beschrieben [2]. Morley et al. (2019) fanden RK in der *Membrana interossea cruris* [71]. In einer weiteren Arbeit beschreiben Moraes et al. (2011) RK in der Kapsel des Hüftgelenks, dem *Ligamentum capitis femoris* sowie dem *Labrum actebuli* [68]. Ebenfalls im *Labrum actebuli* wiesen bereits zuvor Kim et al. (1995) RK nach [55]. Kiter et al. (2010) sehen in RK die zweithäufigste Nervenendigung im *Ligamentum (Lig.) iliolumbale* [56].
An der oberen Extremität sehen Kholinne et al. (2018) in RK den am häufigsten vertretenen Mechanosensor der Gelenkkapsel des Ellenbogengelenks [54]. Vangsness et al. (1995) beschreiben RK im Bandapparat der Schulter, genauer innerhalb der *Ligamenta (Ligg.) coracoclaviculare, coracoacromiale, acromioclaviculare* sowie in den *Ligg. glenohumerale superius, mediale, inferius und posterior* [99]. In der ebenfalls untersuchten *Bursa subacromialis* oder dem *Labrum glenoidale* wurden jedoch keine RK gefunden [99]. RK werden im *Lig. glenohumerale inferius* auch von Steinbeck et al. (2003) und im *Lig. coracoacromiale* auch von Morisawa (1998) beschrieben [70, 95]. Gohlke et al. (1998) berichten ebenfalls von RK im Schultergelenk [36]. Stecco et al. (2006) zeigen RK als eine der am häufigsten vertretenen Nervenendigungen innerhalb der *Fascia brachii* und *Fascia antebrachii* [94]. In den Arbeiten von Cavalcante et al. (2004) und Rein et al. (2015) beschreiben die Autoren RK in Bestandteilen des triangulären fibrokartilaginären Komplexes des Handgelenks [25, 77]. Darüber hinaus wurden von Hagert et al (2004) bei der Untersuchung der Verteilung sensorischer Körperchen RK im *Lig. scapholunare* und darüber hinaus von Petrie et al. (1997) und von Hagert et al. (2005) in weiteren Bändern des Handgelenkes nachgewiesen [38, 39, 74]. Weiter distal beschreiben Hagert et al. (2012) das Verteilungsmuster von Mechanosensoren im Bandapparat des CMC und sehen RK als vorherrschenden Mechanosensor der *Ligg. trapeziometacarpalia*, Lee et al. (2012) zeigen eine Technik zum Nachweis von RK anhand von Proben des Bandapparates des CMC [39, 57].
Yang et al. (2018) haben RK in der degenerierten cervicalen Bandscheibe, Roberts et al. (1995) in den Bandscheiben der unteren Wirbelsäule bei Patienten mit *Lumbago* und/oder *Skoliose* nachgewiesen [78, 104].
Des weiteren wurden RK beschrieben

- in der *Tunica dartos* des Penis [44]
- an Haarfollikeln [42]
- innerhalb der Gesichtsmuskulatur [28]
- im Pharynx [29]
- dem *Discus articularis* der *Art. temporomandibularis* [6]

Dem Vorliegen von RK im *Discus articularis* der *Art. temporomandibularis* widersprechen jedoch die Beobachtungen von Favia et al. (2013). Der Autor findet RK ausschließlich im das Gelenk umgebenden Gewebe, nicht jedoch innerhalb des *Discus articularis* [34].

1.4.2 Das Vater-Pacini-Körperchen

Vater-Pacini-Körperchen (VPK) sind die am schnellsten adaptierenden Sensoren der Somatosensibilität und sind vorwiegend in den tiefen Körperschichten zu finden [88, 92]. Die VPK können somit als RA-2-Rezeptoren charakterisiert werden [88]. Sie detektieren Vibrationen und Druckveränderungen [92]. Letztere kommen z.B. beim Greifen oder Loslassen vor [92]. Wie in Abbildung 1.6 zu erkennen, stellen sich VPK unter dem Lichtmikroskop typischerweise als „zwiebelartige Strukturen“ [64] dar [64]. Dabei liegt im Kern das blanke Axonende, umgeben von mehreren Schichten Schwannzellen und einer Kapsel aus bis zu mehreren dutzend Schichten Perineuralzellen [13, 64, 92]. Jedes VPK wird von einem myelinisierten Axon versorgt, das seine Myelinscheide am Übergang zum Kern verliert [92].
Die Kapsel besitzt die entscheidenden Eigenschaften für die schnelle Adaptation, denn ein Druckreiz führt nur im ersten Moment zu einem kurzen Rezeptorpotential [88]. Danach verformt sich die lamelläre Kapsel und der mechanische Druck kann nicht mehr an das Axonende gelangen [88].
VPK können eine ovale, spherische oder unregelmäßig gewundene Form annehmen und mehrere Millimeter lang werden [64, 92]. Größere Exemplare sind damit makroskopisch sichtbar.

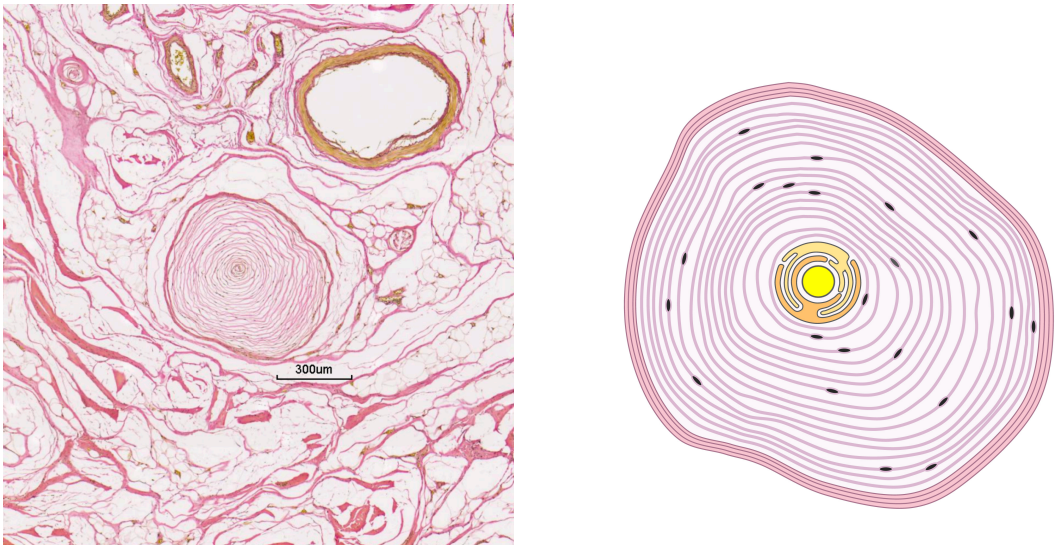


Abbildung 1.6: Vater-Pacini-Körperchen in Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-Färbung (links) und als Schemazeichnung (rechts). Gut erkennbar ist das zentral liegende blanke Axonende und die mehrschichtige Kapsel aus Perineuralzellen [13, 64, 92].

1.4.3 Die Muskelspindel

Muskelspindeln (MSP) sind fusiforme Mechanosensoren, die aus jeweils 5-14 speziellen Muskelfasern bestehen [64, 92]. Diese werden „intrafusale“ Muskelfasern genannt [64, 92]. Sie sind parallel zu den regulären („extrafusalen“) Muskelfasern in die Muskulatur eingelagert [64, 92]. Ihre Enden sind dabei mit dem *Perimysium* verbunden [64]. Die intra-

fusalen Muskelfasern sind von einer Hülle aus Perineuralzellen umgeben, wobei auf Höhe des Äquators die Nervenfasern ein- bzw. austreten [64, 92]. Sie messen als Dehnungsrezeptoren erstens die Länge der extrafusalen Muskulatur in Ruhe und Bewegung, zweitens die Geschwindigkeit der Kontraktion und drittens die Änderung der Geschwindigkeit bei Kontraktion [64, 92].

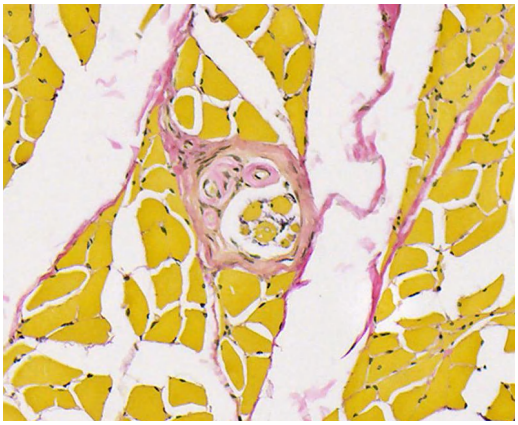


Abbildung 1.7: Axial angeschnittene Muskelspindel in ElHvG-Färbung. Gut zu erkennen ist die intrafusale Muskulatur (gelb) im Inneren des Sensors.

1.5 Ziel der Arbeit

Als Ziel der Arbeit wurde die Kartografierung der an den propriozeptiven Empfindungen beteiligten Mechanosensoren am Daumen gesetzt. Während ihre Verteilungsmuster an großen Gelenken wie dem Knie mehrfach in der Literatur beschrieben sind [23, 30, 45, 50], beschränken sich präzise Untersuchungen des Verteilungsmusters der Mechanosensoren am Daumen auf den Bandapparat des CMC [39]. Dafür sollte zunächst eine möglichst präzise „Landkarte“ der Mechanosensoren am Daumen erstellt werden. In einem zweiten Schritt sollten anhand der Kartografierung dann zuvor unbekannte Verteilungsmuster genauer untersucht werden.

KAPITEL 2

Material und Methoden

2.1 Verwendete Materialien

2.1.1 Geräte

- Metallbandsäge Holzmann Maschinen GmbH BS 128HDR, AT-4170 Haslach
- Gewebeinfiltrationsautomat Leica TP1020, D-35578 Wetzlar
- Modulares Paraffin-Einbettsystem Medite TES Valida, D-31303 Burgdorf
- Rotationsmikrotom Leica RM 2155, D-35578 Wetzlar
- Mikroskopie-Scanner Motic EasyScan Pro 6, D-35578 Wetzlar

2.1.2 Chemikalien

- Intermedium: Roticlear; Firma Carl Roth GmbH + Co. KG, D-76185 Karlsruhe
- Paraffin: Paraplast plus; Firma McCormick Scientific, St. Louis Missouri, USA
- Färbung: Resorcin-Fuchsin-Lösung nach Weigert; Firma Carl Roth GmbH + Co. KG, D-76185 Karlsruhe
- Färbung: Hämatoxylin kristallisiert; Firma Merck KGaA, D-64293 Darmstadt

2.1.3 Software

- Motic EasyScanner
- Motic DS-Assistant
- Apple Vorschau
- Microsoft PowerPoint
- IBM SPSS Statistics

2.2 Ethikvotum

Für diese Arbeit liegt ein postitives Ethikvotum durch die Ethikommission der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf mit Datum vom 13.08.2019 in Form einer Erweiterung der Studienprotokolle mit den Studiennummern 5446 und 5202 vor.

2.3 Die Körperspenden

Für diese Arbeit wurden insgesamt 34 Hände von 19 Körperspenden untersucht. In die Auswertung wurden davon 31 Hände von 17 Körperspenden einbezogen. Diese wurden im unfixiertem Zustand entnommen. Dabei wurden nur Hände, die mit bloßem Auge betrachtet dem physiologischen Zustand entsprechen, verwendet. Solche mit offensichtlichen Verletzungen oder Erkrankungen der Hand oder mit sichtbaren Zugangsnarben im Bereich des Daumens wurden nicht bearbeitet.
Von den 31 in die Studie eingeschlossenen Händen sind 16 rechte und 15 linke Hände. Die 17 Körperspenden waren zum Todeszeitpunkt zwischen 64 und 106 Jahre alt. Es ergibt sich ein durchschnittliches Alter von 80,18 Jahren. 9 waren weiblichen, 8 männlichen Geschlechts.
Die Körperspenderinnen und -spender haben sich vor ihrem Tod für Studienzwecke sowie zur medizinischen Aus-, Fort- und Weiterbildung zur Verfügung gestellt.

2.4 Überblick über die Erstellung der Präparate

Um die Propriosensoren des Daumens zu kartografieren wurden Querschittspräparate von fünf zuvor festgelegten Höhen des Daumens zur histologischen Untersuchung erstellt. Die Entnahmepunkte wurden auf Höhe des IP, MCPP und CMC sowie auf jeweils mittlerer Höhe der PP und des MC gewählt.

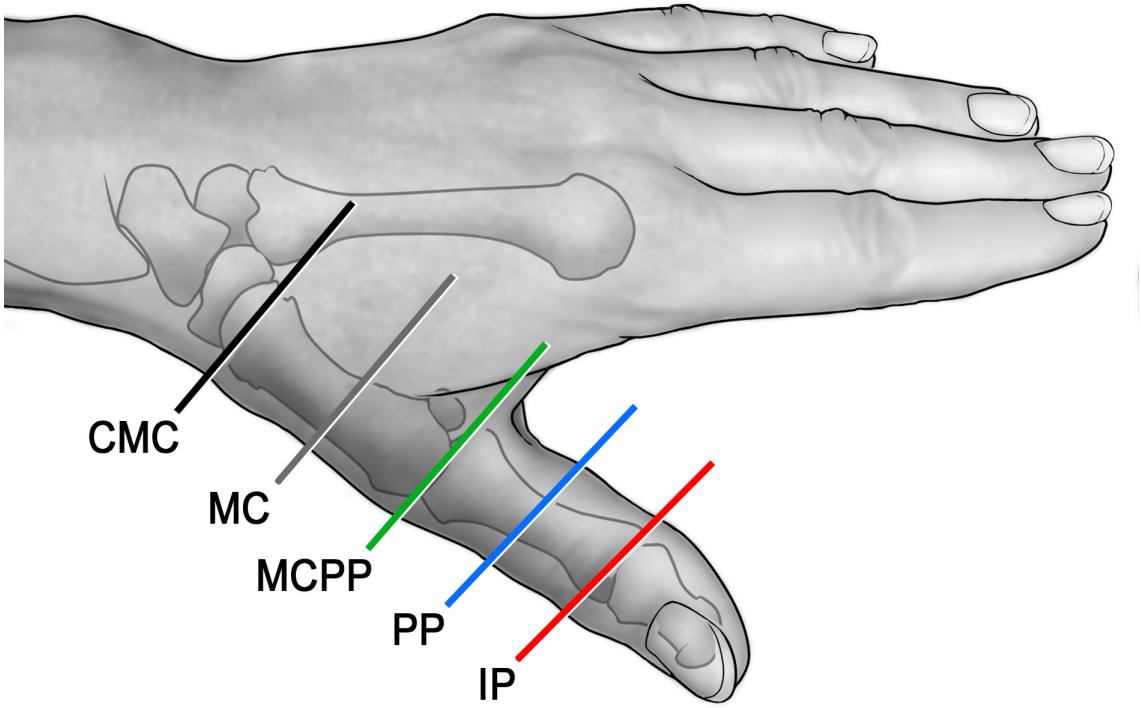


Abbildung 2.1: Die fünf Entnahmeebenen zur Erstellung der Übersichtspräparate. Schwarz: Carpometacarpalgelenk (CMC), Grau: mittlere Höhe des Os metacarpale I (MC), Grün: Metacarpophalagealgelenk (MCPP), Blau: Mitte der Phalanx proximalis (PP), Rot: Interphalangealgelenk (IP)

Die Methodik der Erstellung dieser *Übersichtspräparate* wurde im Verlauf bis zum endgültigen Vorgehen angepasst. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Vorgehensweisen werden in Unterabschnitt 4.2.2 besprochen.
Insgesamt wurden zur Erstellung der Übersichtspräparate 18 Daumen von 10 Körperspenden verwendet. In der Auswertung wurden jedoch nur die nach den Methoden in Unterabschnitt 2.5.2 und Unterabschnitt 2.5.3 gewonnenen Querschnitte berücksichtigt. Darunter fielen 15 Daumen, von denen sieben einer linken und acht einer rechten Hand entstammten. Bei fünf Höhen pro Daumen liegt die Gesamtzahl der erstellten histologischen Übersichtspäparate bei n_U=75.

Nach Auswertung der Übersichtspräparate wurden zur Validierung der dabei erhaltenen Ergebnisse weitere 16 Daumen von 9 Körperspenden untersucht. Davon entstammten acht einer rechten und acht einer linken Hand. An ihnen wurde gezielt das Vinculum breve zur lichtmikroskopischen Untersuchung entnommen. Es wurde jeweils ein histologisches Präparat pro Vinculum breve erstellt. Die Gesamtzahl der histologischen *Validierungspräparate* liegt somit bei n_V=16.

2.5 Erstellung der Übersichtspräparate

2.5.1 Erster Präparationsversuch

Zuerst wurden drei Hände von zwei bereits zuvor in 4% Formaldehyd fixierten Körperspenden präpariert. Von diesen wurde der Daumen unter Einschluss des Os trapezium in der Sagittalebene entlang der radialen Seite des Os metacarpale II abgetrennt. Proximal wurde das Os trapezium von den benachbarten Handwurzelknochen abgelöst. Das so erhaltene Präparat des Daumens unter Einschluss des Daumenballens zeigt Abbildung 2.2.



Abbildung 2.2: Abgetrennter rechter Daumen mit Os trapezium bei in Formaldehyd fixierter Körperspende

Im nächsten Schritt wurden die dorsalen und palmaren Weichteile vom entsprechenden Knochen gelöst. Dafür wurden die Daumen zunächst von distal über eine Halteklemme in einen Schraubstock eingespannt. Begonnen wurde mit der Präparation über dem CMC. Hier erfolgte zunächst ein radialseitiger Einschnitt am Übergangsbereich der Leisten- zur Felderhaut. Anschließend wurden die Weichteile sowohl nach dorsal als auch nach palmar zirkulär mit dem Skalpell von der Basis des MC sowie vom Os trapezium gelöst. Das Os Trapezium wurde anschließend entfernt. Das gewonnene Material wurde jeweils am ulnaren Schnittrand mit grünem Gewebemarker gekennzeichnet. Für die weitere Präparation nach distal wurde nun eine Schraube axial intramedulär in das MC bzw. nachfolgend die PP eingebracht und der Daumen darüber fest eingespannt. Anschließend wurden die Weichteile über den verbleibenden Höhen wie oben beschrieben in einen dorsalen und einen ventralen Abschnitt getrennt und zirkulär abgelöst.
Nach dieser Vorgehensweise wurden drei Daumen präpariert. Sie wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

2.5.2 Zweiter Präparationsversuch

Vier Daumen von zwei Körperspenden, je zwei der linken und zwei der rechten Seite, wurden zunächst in der in Unterabschnitt 2.5.1 genannten Art und Weise im unfixierten Zustand entnommen. Anschließend wurden sie in 4% Formaldehyd für mindestens zwei Wochen fixiert. Die Daumen wurden dann bei -80°Celsius (C) 24 Stunden (h) lang tiefgefroren. Im nächsten Schritt wurden die gefrorenen Daumen in die Metallbandsäge BS 128HDR der Firma Holzmann Maschinen GmbH eingespannt und zu ca. 0,5 Centimeter (cm) breiten Querschnitten der fünf Höhen gesägt. Die jeweils fünf Querschnitte pro Daumen wurden daraufhin über 24h in 4% Formaldehydlösung bei Zimmertemparatur aufgetaut. Im letzten Schritt wurden die knöchernen Anteile mit dem Skalpell aus den Querschnitten gelöst und entfernt (s. Abbildung 2.3).

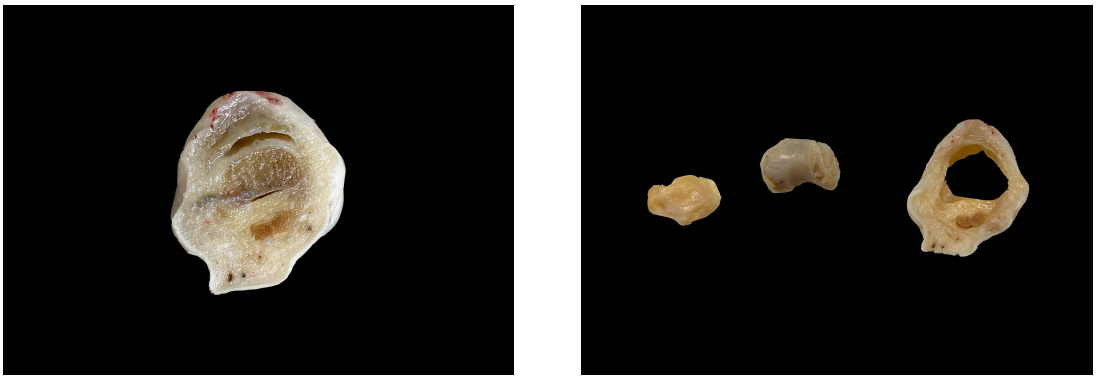


Abbildung 2.3: Querschnitte auf Höhe des IP eines linken Daumens vor (links) und nach (rechts) Entfernung des Köpfchens der PP und der Basis der PD

2.5.3 Endgültige Variante

Elf Hände von insgesamt sechs unfixierten Körperspenden wurden zunächst am distalen Drittel der Unterarme amputiert und anschließend für mindestens zwei Wochen in 4% Formaldehydlösung fixiert. Sie teilten sich in sechs rechte und fünf linke Hände auf. Die Hände wurden danach auf einer vorgeformten Platte befestigt, auf welcher die Daumen in abgespreiztem Zustand mit jeweils annähernd gleicher Gelenkstellung arretiert wurden. So waren IP und MCPP jeweils maximal extendiert und CMC maximal radialabduziert. In diesem Zustand wurden die Hände für mindestens 24h bei -80°C tiefgefroren. Die Hände konnten in diesem Zustand anschließend über den *Hypothenar* fest in die Metallbandsäge eingespannt werden. Die Daumen wurden dann Schritt für Schritt von distal nach proximal gesägt und auf diese Weise die jweils ca. 0,5cm breiten Querschnitte der fünf Höhen erstellt (s. Abbildung 2.4).
Für die Querschnitte proximal der Höhe des MCPP mussten zuvor die Finger 2-5 und die ulnare Mittelhand parallel zum Os metacarpale 2 abgetrennt werden. Die fertigen Präparate wurden dann für mindestens 24h in 4% Formaldehydlösung bei Zimmertemparatur aufgetaut. Anschließend konnten die knöchernen Anteile mit dem Skalpell aus den Querschnitten herauspräpariert werden (s. Abbildung 2.3).



Abbildung 2.4: Beispiele der Erstellung der Übersichtspräparate. Die Hände sind über den *Hypothenar* in die Metallbandsäge eingespannt. Links: Blick von oben. Rechts: Blick von schräg vorn.

Aus den Präparationen aus diesem und Unterabschnitt 2.5.2 wurden insgesamt 75 histologische Übersichtspräparate erstellt, die alle Weichteilstrukturen der jeweiligen Höhe abbilden.

2.6 Erstellung der Validierungspräparate

Das Vinculum breve wurde zusätzlich an 16 Daumen von 9 Körperspenden präpariert. Ziel war die Erstellung gezielter histologischer Querschnitte des Vinculum breve zur Validierung der Ergebnisse der Übersichtspräparate.
Dafür wurde ein zentraler Längsschnitt über die palmare Seite des Daumens von der Fingerbeere bis über den *Thenar* gesetzt und sowohl Cutis als auch Subcutis entfernt. Die Sehnenscheide wurde längs von proximal nach distal unter Durchtrennung der Ringbänder A1 und A2 sowie des *oblique pulley* eröffnet, die Sehne des FPL mobilisiert und auf Höhe des MCPP durchtrennt. Nun konnte das Vinculum breve untersucht werden (s. Abbildung 3.8). Es wurde anschließend in einem Paket zusammen mit dem ansatznahen Anteil der FPL-Sehne und der palmaren Platte entnommen (s. Abbildung 2.6). Dafür wurde die palmare Platte in rechteckiger Form unter Durchtrennung des Ansatzes der FPL-Sehne ausgeschnitten und abgelöst. Die proximale Begrenzung des gedachten Rechtecks stellte dabei das proximale Ende des Vinculum breve, die distale Begrenzung stellte der Sehnenansatz des FPL.

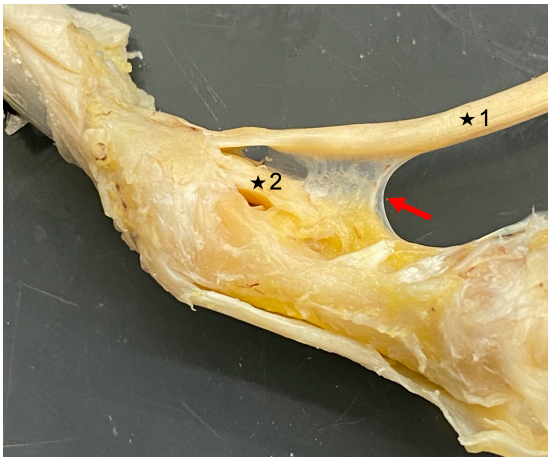


Abbildung 2.5: Freigelegtes Vinculum breve (roter Pfeil an dessen proximalem Rand) eines linken Daumens über der PP. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte

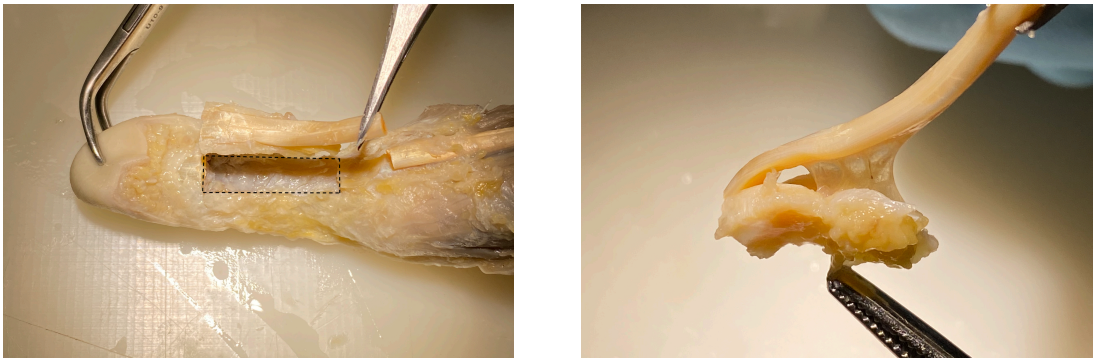


Abbildung 2.6: Bild des entnommenen „Pakets“ aus dem distalen Anteil der Sehne des FPL, dem Vinculum breve und der palmaren Platte.

Das so erhaltene Paket (s. Abbildung 2.6) wurde auf einen ca. 1 cm breiten Anteil auf mittlerer Höhe des Vinculum breve eingekürzt, um in den daraus zu erstellenden Paraffin-Blöcken stets sicher das Vinculum breve anzuschneiden.
Auf diese Weise wurden 16 histologische Präparate erstellt, auf welchen sich die Sehne des FPL, das Vinculum breve sowie die palmare Platte abbilden.

2.7 Erstellung der histologischen Präparate

2.7.1 Übersicht

Zu Erstellung der histologischen Präparate sind folgende Schritte notwendig [65]:

- Fixieren
- Entwässern/Einbetten
- Schneiden
- ggf. Entpraffinieren
- Färben

Die verwendeten Daumen wurden zuvor in 4% Formaldehydlösung chemisch fixiert. Nach abgeschlossener Präparation wurden die Proben zunächst für 24h unter langsam fließendem Leitungswasser gewässert. Anschließend wurden sie dem Gewebeinfiltrationsautomaten zur Entwässerung zugeführt. Nach der Entwässerung wurden die Proben in flüssigem Parrafin zu Blöcken gegossen. Sie wurden dann mit dem Mikrotom geschnitten, auf die Objektträger aufgebracht und gefärbt. Der Anschnitt erfolgte stets von proximal. Für die Färbung wurde eine Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson (ElHvG)-Färbung gewählt.

2.7.2 Entwässern, Einbetten und Schneiden

Die Entwässerung ist der erste Schritt des Einbettens. Beim Einbetten wird das Gewebe mit flüssigem Paraffin durchdrungen. Es dient dem Zweck das Gewebe in eine Konsistenz zu bringen, in der es möglichst fein geschnitten werden kann [65]. Da Paraffin hydrophob ist, muss das Wasser den Proben zuvor vollständig entzogen werden [65]. Es wird dafür zunächst schrittweise mit *Ethanol* und dieses wiederum mit einem Intermedium, hier *Roticlear*, ersetzt. Das Intermedium kann dann final durch Paraffin ersetzt werden.
Dieser Vorgang läuft automatisiert ab. Dafür wurde der Gewebeinfiltrationsautomat Leica TP1020 verwendet. Die einzelnen Schritte, welche die Proben in dem Automaten durchlaufen, sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

	Agens	Dauer
Station 1	Isopropanolol 50%	10h
Station 2	Isopropanolol 70%	10h
Station 3	Isopropanolol 90%	10h VAC
Station 4	Isopropanolol 96% (1)	10h
Station 5	Isopropanolol 96% (2)	10h VAC
Station 6	Isopropanolol absolut (1)	10h
Station 7	Isopropanolol absolut (2)	10h VAC
Station 8	Roticlear (1)	10h
Station 9	Roticlear (2)	10h VAC
Station 10	Roticlear (3)	10h
Station 11	Paraffin (1)	12h VAC
Station 12	Paraffin (2)	8h

Tabelle 2.1: Die vorprogrammierten Schritte des Gewebeinfiltrationsautomaten. VAC = der Schritt findet unter Vakuum statt.

Sobald die Entwässerung abgeschlossen ist, können die Präparate in flüssigem Paraffin zu Blöcken gegossen werden. Dafür wurde das Paraffin-Einbettsystem Medite TES Valida verwendet.
Nachdem die Proben abgekühlt und ausgehärtet sind können sie geschnitten werden. Zum Schneiden wurde das Leica RM 2155 Rotationsmikrotom verwendet. Der Anschnitt erfolgte stets am proximalen Schnittrand der Probe. Die Zuschnitte wurden mit einer Dicke von 7 µm angefertigt, auf einen passenden Objektträger aufgebracht und 24h bei 37°C im Wärmeschrank getrocknet. In diesem Zustand konnten sie entweder dauerhaft aufbewahrt oder entparaffiniert und gefärbt werden.

2.7.3 Entparaffinieren

Die Notwendigkeit sowie der Ablauf dieses Vorgangs sind grundsätzlich abhängig von der gewünschten Färbung. Da es sich bei der hier verwendeten ElHvG-Färbung um eine wässrige Lösung handelt, ist die Entparaffinierung notwendig. Dafür werden die Schnitte auf den Objektträgern zunächst erwärmt. Anschließend werden sie in mehreren Schritten in Xylol sowie Alkohol absteigender Konzentration gebadet. Da die ElHvG-Färbung mit Alkohol angesetzt ist, muss dabei lediglich bis zum Bad mit 70% Alkohol vorgegangen werden. Für andere Färbungen würde sich zum Beispiel 50% Alkohol und destilliertes Wasser anschließen. Nach dem Entparaffinieren kann unmittelbar mit der Färbung begonnen werden. Die Schritte sind in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Wärmeschrank 70°C	15min
Xylol (1)	15min
Xylol (2)	15min
Alkohol absolut	4min
Alkohol absolut	4min
Alkohol 96%	4min
Alkohol 90%	4min
Alkohol 70%	4min

Tabelle 2.2: Übersicht über die Schritte der Entparaffinierung

2.7.4 Färben

Für die ElHvG-Färbung werden eine Elastica-Lösung, Weigert‘sches Eisenhämatoxylin und eine van-Gieson-Lösung benötigt.
Zur Herstellung der Elastica-Lösung werden 10 Gramm (g) Resorcin-Fuchsin in 1000 Milliliter (ml) 80% Alkohol unter Erwärmen gelöst. Nach dem Erkalten werden 20 ml konzentrierte Salzsäure zugesetzt und die Lösung filtriert.
Das Weigert‘sche Eisenhämatoxylin entsteht durch Zusammenfügen zweier Lösungen A und B unmittelbar vor Gebrauch. Um Lösung A zu erhalten wird 1 g Hämatoxylin in 100 ml 96% Äthanol gelöst um anschließend eine Woche zu reifen. Für Lösung B werden 4 ml 29% Eisen(III)-chlorid, 1 ml 25% Salzsäure und 25 ml aqua bidestilata gelöst.
Zur Herrstellung der van-Gieson-Lösung werden zu 100 ml gesättigter, wässriger Pikrinsäure 7,5 ml 1% Säurefuchsin hinzugefügt.

Die erforderlichen Schritte für die ElHvG-Färbung der histologischen Präparate sind in der nachfolgenden Tabelle 2.3 aufgelistet.

	Dauer
Bad in Elastica-Lösung	40 min
abspülen in Leitungswasser	bis Wasser klar ist
Bad in Weigert‘schem Eisenhämatoxylin	5 min
fließend wässern	5 min
spülen in aqua bidestilata	
Bad in van-Gieson-Lösung	genau 1 min
2x kurze Spülung in aqua bidestilata	
2x Bad in 96% Alkohol	je 2 min
2x Bad in 100% Alkohol	je 2 min
Bad in Xylol	2 min

Tabelle 2.3: Schritte der ElHvG-Färbung

An die Färbung schließt sich das Eindecken mit dem xylolhaltigen Eindeckmedium DePex und einem Deckglas an.
Im ElHvG angefärbten histologischen Präparat zeigen sich elastische Fasern schwarzviolett und kollagenes Bindegewebe rot. Zellkerne sind blau-schwarz angefärbt und Muskulatur gelb. Epithelgewebe stellt sich bräunlich dar (siehe u.a. auch Abbildung 2.8).

2.8 Methodik der Auswertung

Alle histologischen Präparate wurden mit dem Motic EasyScan Pro 6 Microskopie-Scanner in 20-facher Vergrößerung digitalisiert und anschließend als „JPEG-2000“ Datei exportiert. So konnten sie mit jedem üblichen Bildbearbeitungsprogramm untersucht werden. Für die Auswertung wurde das Vorschau-Programm der Firma Apple verwendet. Ein gefundener Mechanosensor wurde mit einem Punkt der ihm zugeordneten Farbe (RK = blau, VPK = rot, MSP = grün) markiert und tabellarisch erfasst.

2.8.1 Auswertung der Übersichtspräparate

Die Übersichtspräparate wurden zunächst auf Verteilungsmuster der Mechanosensoren untersucht. Dafür wurde eine topografische Zuordnung der Mechanosensoren in vier Quadranten vorgenommen.

- Dorsal (Quadrant I)
- Ulnar (Quadrant II)
- Palmar (Quadrant III)
- Radial (Quadrant IV)

Da sich die Präparate je nach Schnittebene anatomisch deutlich unterscheiden, mussten die Bezugspunkte für die Einteilung der Quadranten für jede der fünf Schnittebenen zuvor einzeln definiert werden.
Die Bezugspunkte der Übersichtspräparate auf mittlerer Höhe der PP und auf Höhe des IP stellten dabei die insgesamt vier radiodorsalen und radioventralen sowie ulnodorsalen und ulnoventralen Gefäß-/Nervenbündel dar. Ein gedachtes Kreuz, dessen Balken durch die vier Bündel verlaufen und sich annähernd mittig des entfernten Knochens treffen, diente dann zur Unterteilung der Quadranten (s. Abbildung 2.7).
Auf Höhe des MCPP sind die Gefäß-/Nervenbündel noch nicht entsprechend konfiguriert (s. Unterabschnitt 1.2.3). Im Querschnitt zeigt sich das Köpfchen des MC jedoch in annäherungsweise quadratischer Grundform, sodass hier die gedachten Ecken des Quadrats als Orientierungspunkte für die Einteilung in Quadranten genutzt wurden.

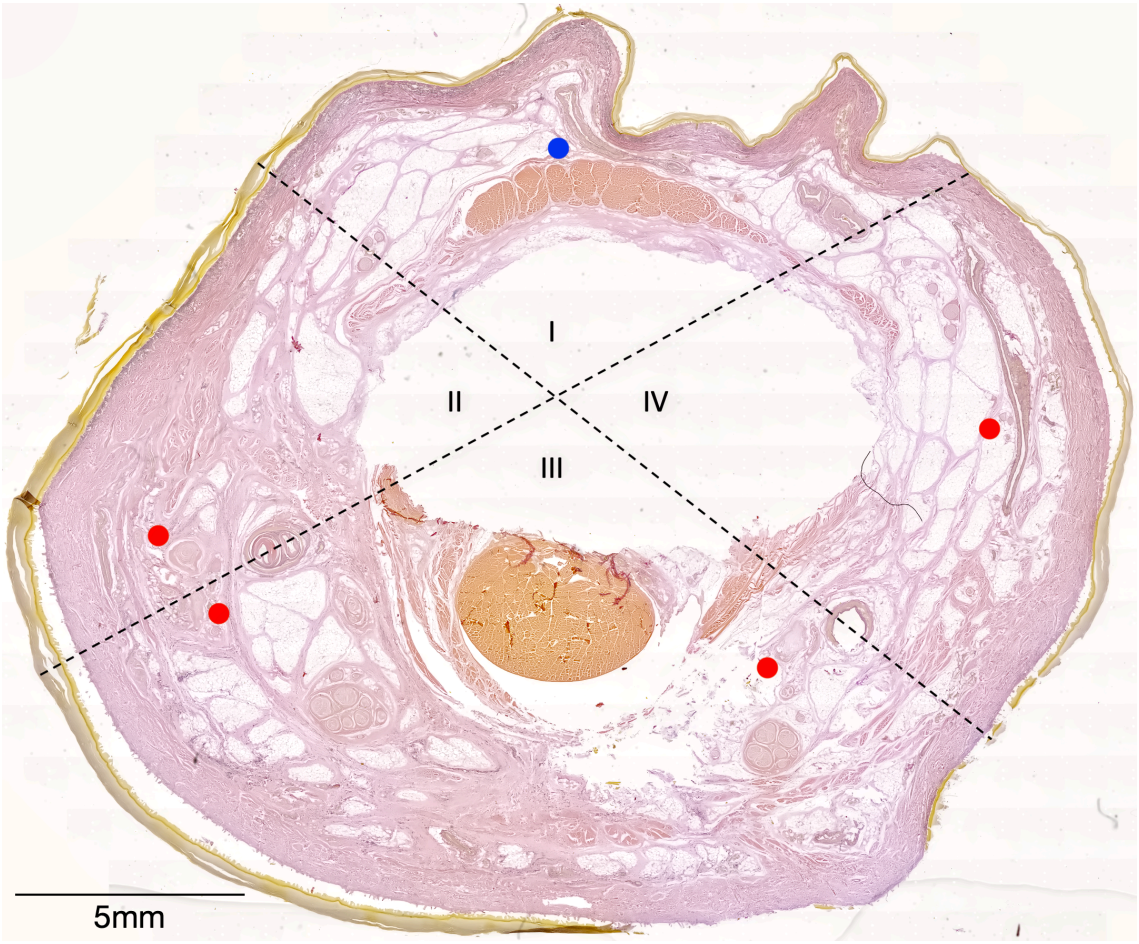


Abbildung 2.7: Beispiel der digitalen Auswertung der Übersichtspräparate. Querschnitt eines linken Daumens auf mittlerer Höhe der PP. Ansicht von proximal. ElHvG-Färbung. Das Präparat wird durch die gestrichelten Linien, welche sich an den 4 Gefäß-/Nervenbündeln orientieren, in 4 Quadranten geteilt. Die Markierungen liegen jeweils Nahe eines VPK (rot) und genau dorsal eines RK (blau).

Auf mittlerer Höhe des MC und auf Höhe des CMC wurden die Strecksehnen von EPL, EPB, APL (APL nur in CMC) und die Sehne des FPL als gegenüberliegende Orientierungspunkte genutzt. Durch die Mitte der Strecksehnen und die Mitte der Sehne des FPL wurde nun eine Gerade gelegt, die als Längsachse für ein rechtwinkliges Kreuz diente. Das Kreuz wurde anschließend so gedreht, das jeweils die Strecksehnen das Zentrum des dorsalen Quadranten und die Sehne des FPL das Zentrum des ventralen Quadranten darstellen (s. Abbildung 2.8).

Die Quadranten wurden separat nach den Mechanosensoren RK, VPK und MSP abgesucht. Die Sensoren wurden markiert und tabellarisch erfasst.

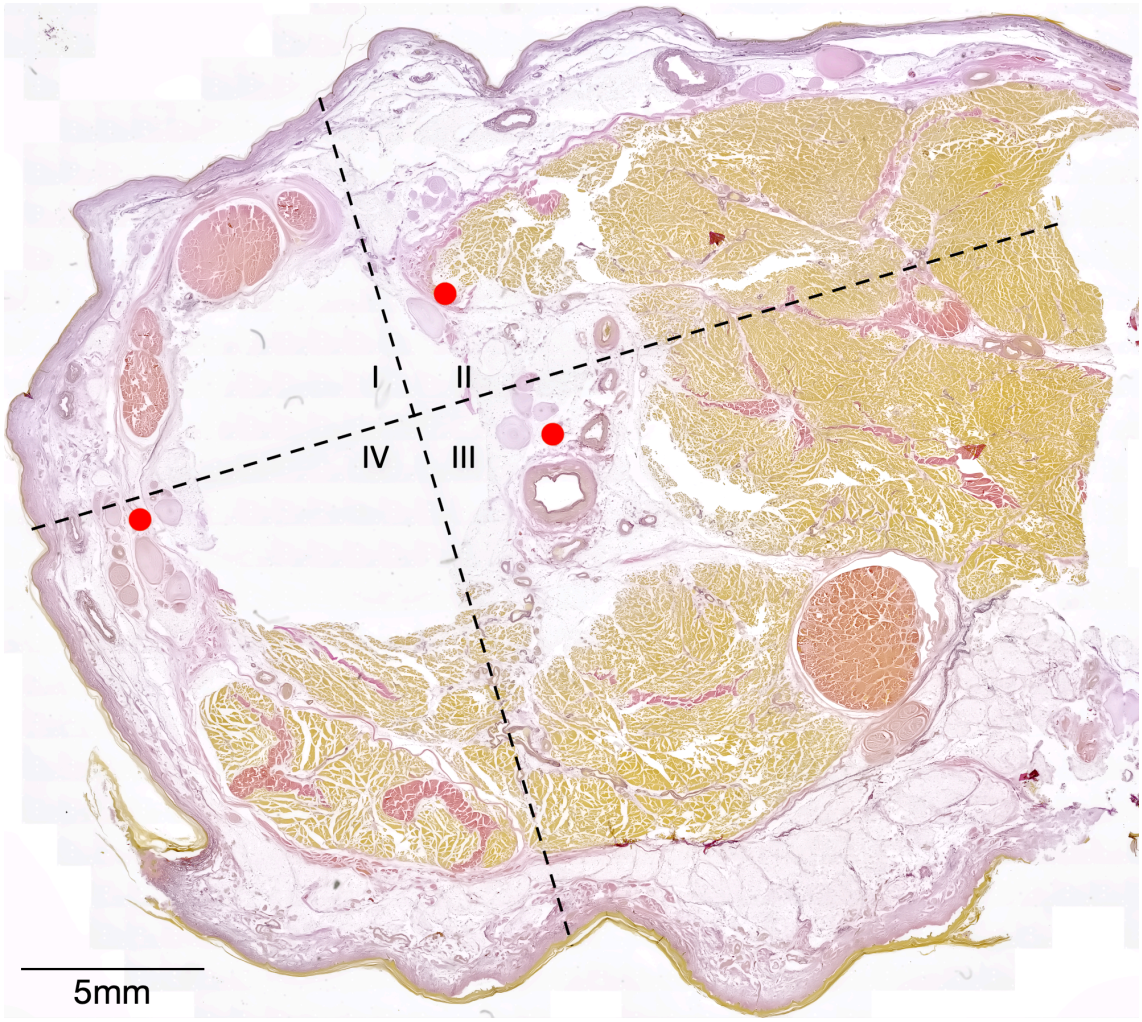


Abbildung 2.8: Beispiel der digitalen Auswertung der Übersichtspräparate. Querschnitt eines rechten Daumens auf mittlerer Höhe des MC. Ansicht von proximal. ElHvG-Färbung. Das Präparat wird durch die senkrecht zueinander stehenden gestrichelten Linien in 4 Quadranten geteilt. Sie orientieren sich an den Strecksehnen des Daumens und der Sehne des FPL. Die Markierungen (rot) kennzeichnen beispielhaft einige VPK.

Präparate mit ausgeprägten Artefakten wurden mit einem Versatz nach distal um 500 µm erneut geschnitten. Davon waren insgesamt 18 Präparate betroffen. Aufgrund fortwährender starker Artefakte wurden schließlich 6 Übersichtspräparate aus der Wertung ausgeschlossen.

2.8.2 Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne der Übersichtspräparate

In der Übersichtsauswertung zeigten sich Häufungen im Bereich des Mesotendineums (s. dazu Kapitel 3). Daher wurden alle 75 Übersichtsräparate in einer zweiten Auswertungsreihe auf die genaue Verteilung der Mechanosensoren an der FPL-Sehne und ihrer direkten Umgebung untersucht. Dafür wurden die RK nach folgenden Kriterien topografisch eingeordnet und tabellarisch erfasst:

- Lage innerhalb des Mesotendineums (sofern vorhanden)
- Lage innerhalb der FPL-Sehne
- Lage an der Sehnenscheide
- sonstiger Bezug

Unter „sonstiger Bezug“ wurden z.B. Sensoren innerhalb der palmaren Platte gezählt.

2.8.3 Auswertung der Validierungspräparate

Die 16 histologischen Präparate der Pakete mit FPL-Sehne, Vinculum breve und palmarer Platte dienten der Validierung der Ergebnisse der Übersichtspräparate. Sie wurden lichtmikroskopisch gezielt auf RK im Vinculum breve untersucht. Die Ergebnisse wurden tabellarisch festgehalten.

2.8.4 Statistik

Zur Signifikanzanalyse wurde der Chi-Quadrat-Test nach Pearson mit Hilfe des Statistikprogramms IBM SPSS Statistics durchgeführt.

2.8.5 Grafiken

Die in dieser Arbeit verwendeten Grafiken (Abbildung 1.4, Abbildung 1.5, Abbildung 1.6, Abbildung 2.1) wurden unter Mitwirkung durch Christine Opfermann-Rüngeler erstellt.

KAPITEL 3

Ergebnisse

3.1 Übersicht

Die Ergebnisse der Auswertung aller histologischen Präparate werden nachfolgend gegliedert aufgeführt. Zunächst werden die Ergebnisse der Übersichtspräparate aus den Auswertungen nach Quadranten sowie der gezielten Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne dargestellt.
Anschließend werden in Abschnitt 3.3 die Ergebnisse der Validierungspräparate aufgeführt.
Das zentrale Ergebnis der Übersichts- und Validierungspräparate wird schließlich in Abschnitt 3.4 zusammen dargestellt.

3.2 Ergebnisse der Übersichtspräparate

3.2.1 Querschnitt auf Höhe des IP

Alle 15 Übersichtspräparate mit Schnitthöhe durch das IP wurden in der Auswertung berücksichtigt. Bei ihnen ist zentral die Sehne des FPL zu erkennen (s.Abbildung 3.1). Dorsal der FPL-Sehne liegt stets die palmare Platte. Die Dorsalaponeurose ist regelhaft als zusammenhängende Sehnenplatte abgebildet.
Die Arterien und Nerven des distalen Daumens zeigen sich in jedem der Präparate in der Konfiguration von vier Gefäß-Nervenbündeln, einem jeweils dorsalen und palmaren radialseitigem Bündel und einem jeweils dorsalen und palmaren ulnarseitigem Bündel.

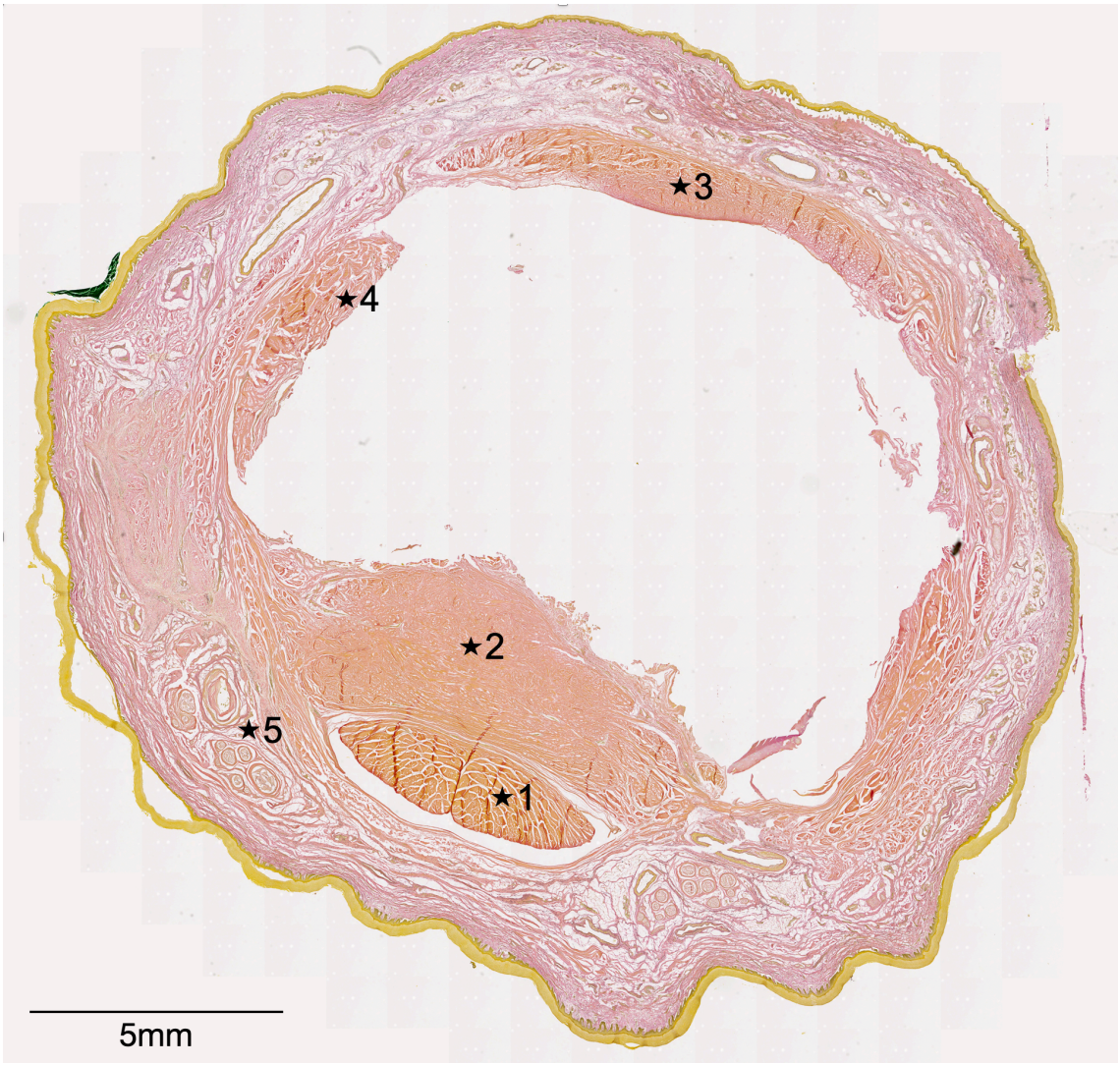


Abbildung 3.1: Querschnitt auf Höhe des IP eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Dorsalaponeurose, 4 = Lig. collaterale radiale, 5 = palmares Gefäß-/Nervenbündel mit A. radiopalmaris pollicis und N. palmaris digitalis proprii

Betrachtet man die vier Quadranten der Querschnitte auf Höhe des IP so ergibt sich in der Summe beziehungsweise im arithmetischen Mittel pro Daumen folgendes Verteilungsmuster:

Quadrant	RK		VPK	
	rechts	links	rechts	links
I	21 (2,63)	18 (2,57)	1 (0,14)	5 (0,71)
II	3 (0,38)	1 (0,14)	3 (0,38)	2 (0,29)
III	20 (2,50)	13 (1,86)	20 (2,50)	37 (5,29)
IV	3 (0,38)	2 (0,29)	3 (0,38)	3 (0,43)

Tabelle 3.1: Verteilung der RK und VPK in den 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des IP, eingeordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

Da sich auf den Übersichtspräparaten auf Höhe des IP keine Skelettmuskulatur abbildet, sind keine MSP zu finden.
Das Vinculum breve wurde in allen 15 Präparaten angeschnitten. Es liegt stets, dem Knochen und der palmaren Platte zugewandt, an der Dorsalseite der FPL-Sehne. Es tritt mit unterschiedlicher Morphologie auf (s. Abbildung 3.2). So ist es in zwei Präparaten als schmaler Strang zu erkennen. Dies ist jeweils am rechten und linken Daumen der gleichen Körperspende der Fall. Meist zeigt sich das Vinculum breve jedoch am Hilum der FPL-Sehne in breitbasiger Form.

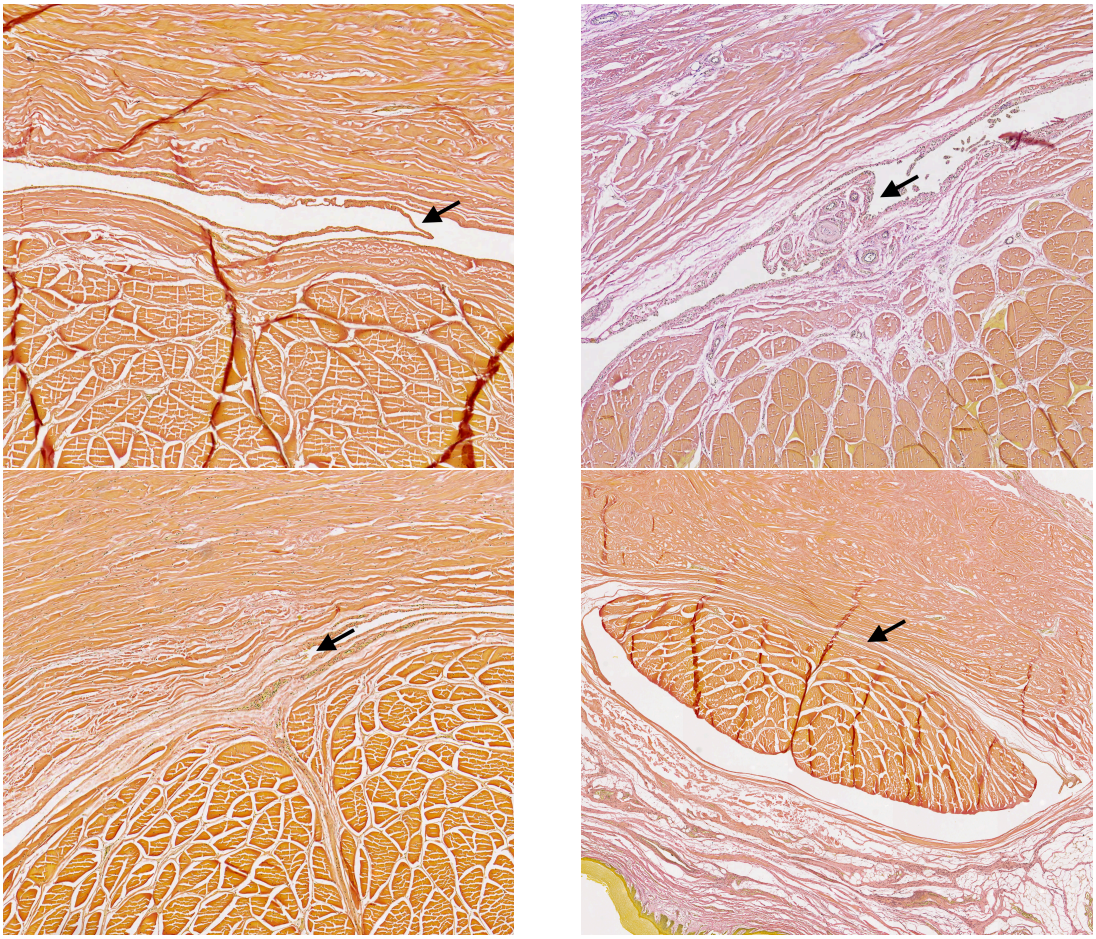


Abbildung 3.2: Die Bilder zeigen Beispiele für die unterschiedliche Morphologie des Vinculum breve (durch Pfeile markiert) in den histologischen Präparaten auf Höhe des IP.

In 13 der 15 Präparate sind RK im Vinculum breve abgebildet. Dieses Ergebnis wird in Abschnitt 3.4 gesondert besprochen.
VPK zeigen sich in 3 von 15 Fällen im Vinculum breve auf Höhe des IP. Bei der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne auf Höhe des IP ergab sich des weiteren folgendes Verteilungsmuster:

Lage	RK	
	rechts	links
im Vinculum breve	14 (1,75)	9 (1,29)
innerhalb der FPL Sehne	0	0
an der Sehnenscheide	2 (0,25)	0
sonstiger Bezug	1 (0,13)	2 (0,29)

Tabelle 3.2: Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des IP in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

3.2.2 Querschnitt auf mittlerer Höhe der PP

Alle 15 Übersichtspräparate auf mittlerer Höhe der PP wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Zentral ist ebenfalls die Sehne des FPL zu erkennen. Sie wird in allen 15 Schnitten vom *oblique Pulley* umgeben. Die palmare Platte des IP setzt sich in keinem der Schnitte bis zu dieser Höhe nach proximal fort und ist dementsprechend nicht abgebildet. Die Dorsalaponeurose ist stets als zusammenhängende Sehnenplatte zu erkennen. Die Gefäß-Nervenbündel zeigen sich mittig der PP bereits stets in der viergliedrigen Konfiguration wie auf Höhe des IP.



Abbildung 3.3: Querschnitt auf mittlerer Höhe des PP eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Knochen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = *oblique pulley*, 3 = Dorsalaponeurose, 4 = A. ulnodorsalis pollicis, 5 = palmares Gefäß-/Nervenbündel mit A. ulnopalmaris pollicis und N. palmaris digitalis proprii

Betrachtet man die vier Quadranten der Querschnitte auf mittlerer Höhe der PP so ergibt sich in der Summe beziehungsweise im arithmetischen Mittel pro Daumen folgendes Verteilungsmuster:

Quadrant	RK		VPK	
	rechts	links	rechts	links
I	12 (1,5)	9 (1,29)	1 (0.13)	2 (0,29)
II	4 (0,5)	3 (0,43)	4 (0,5)	8 (1,14)
III	11 (1,38)	13 (1,86)	37 (4,63)	31 (4,43)
IV	1 (0,13)	0	13 (1,63)	10 (1,43)

Tabelle 3.3: Verteilung der RK und VPK in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe der PP, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

Auch auf mittlerer Höhe der PP bildet sich keine Skelettmuskulatur ab, weshalb auch hier keine MSP zu finden sind.

Das Vinculum breve ist in 4 der 15 Präparate angeschnitten, von denen in einem einzigen RK abgebildet sind. Zwei der angeschnittenen Vincula breve entstammen einem rechten und zwei einem linken Daumen.
Bei der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne auf mittlerer Höhe der PP ergab sich des weiteren folgendes Verteilungsmuster:

Lage	RK	
	rechts	links
im Vinculum breve	2 (1,00)	0
innerhalb der FPL Sehne	0	0
an der Sehnenscheide	1 (0,13)	4 (0,57)
sonstiger Bezug	0	0

Tabelle 3.4: Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe der PP in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

3.2.3 Querschnitt auf Höhe des MCPP

Von den 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des MCPP wurden zwölf in der Auswertung berücksichtigt, darunter sieben der rechten und fünf der linken Körperhälfte. Die Präparate zeigen zentral die Sehne des FPL. Ihr liegt dorsal die palmare Platte an, in welche stets die beiden *Ossa sesamoidea* eingelagert sind. Auf der Dorsalseite der Präparate sind die Sehne des EPL und des EPB zu erkennen, welche in sechs der zwölf Präparate noch nicht zur Dorsalaponeurose vereint sind.
Ein Mesotendineum bildet sich in keinem der Präparate auf dieser Höhe ab. Aus diesem Grund wurde die Umgebung der FPL-Sehne in den Übersichtspräparaten auf Höhe des MCPP nicht gesondert untersucht.

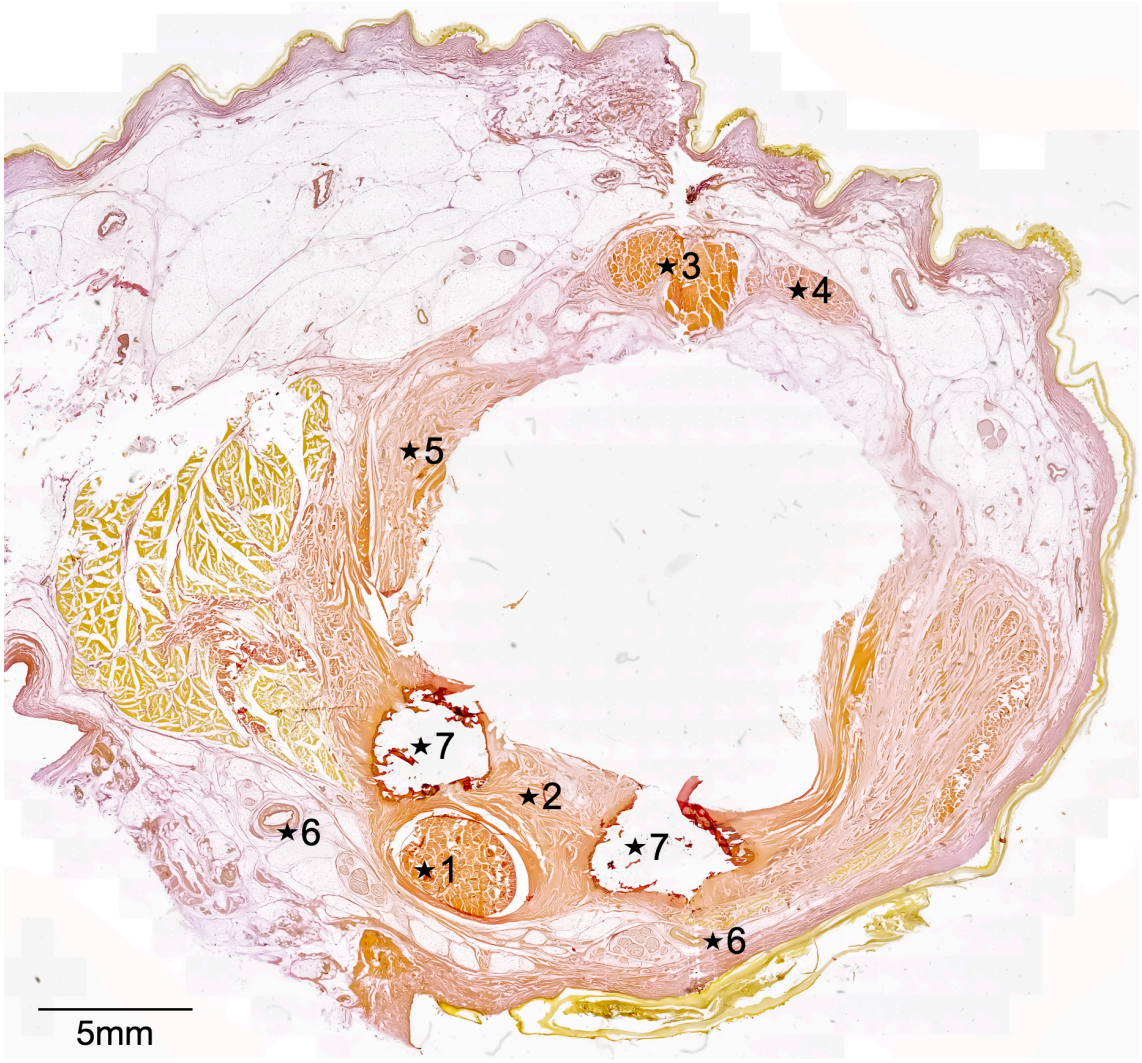


Abbildung 3.4: Querschnitt auf Höhe des MCPP eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Sehne des EPL, 4 = Sehne des EPB, 5 = Lig. collaterale ulnare, 6 = A. ulnopalmaris und radiopalmaris pollicis, 7 = entfernte Ossa sesamoidea

Betrachtet man die vier Quadranten der Querschnitte auf Höhe des MCPP so ergibt sich in der Summe beziehungsweise im arithmetischen Mittel pro Daumen folgendes Verteilungsmuster:

Quadrant	RK		VPK		MSP	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links
I	19 (2,71)	5 (1,00)	0	0	0	0
II	6 (0,86)	2 (0,40)	2 (0,29)	1 (0,20)	0	0
III	10 (1,43)	6 (1,20)	10 (1,43)	14 (2,80)	0	3 (0,60)
IV	3 (0,43)	1 (0,20)	2 (0,29)	0	0	0

Tabelle 3.5: Verteilung der RK, VPK und MSP in den 12 Übersichtspräparaten auf Höhe des MCPP, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

3.2.4 Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC

Alle 15 Übersichtspräparate der mittleren Höhe des MC wurden in der Auswertung berücksichtigt. Die A. princeps pollicis zeigt sich in 14 von 15 Präparaten als einzelnes kaliberstarkes Gefäß in unmittelbarer Nähe beugeseitig zum Knochenschaft. Einmal liegt sie ulnarseitig des Schaftes des MC. Die Sehnen des EPL und EPB verlaufen an der Dorsalseite getrennt voneinander. Die Sehne des EPL wird dabei in sieben Präparaten von einer akzessorischen Sehne begleitet (s. Abbildung 3.5).
Darüber hinaus bildet sich in den histologischen Präparaten der mittleren Höhe des MC die Muskulatur des Thenars ab. Zu den abgebildeten Muskeln gehören der M. interosseus dorsalis I, ADP, FPB, OPP, APB (s. Tabelle 1.1).

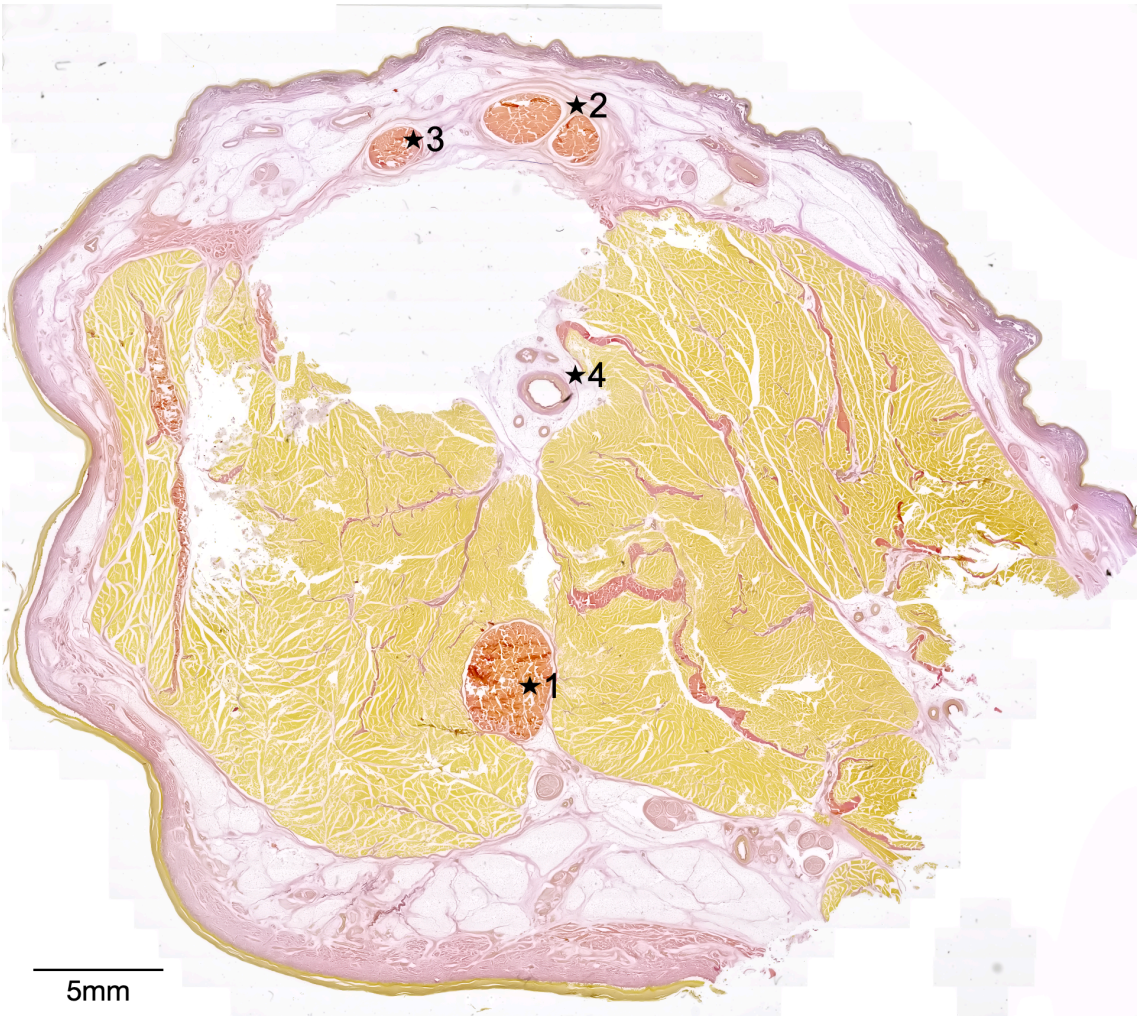


Abbildung 3.5: Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Knochen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = Sehne des EPL mit akzessorischer Sehne, 3 = Sehne des EPB, 4 = A. princeps pollicis. Abgebildete Muskulatur von rechts im Uhrzeigersinn: M. interosseus dorsalis I, ADP, FPB, OPP, APB

Betrachtet man die vier Quadranten der Querschnitte auf mittlerer Höhe des MC so ergibt sich in der Summe beziehungsweise im arithmetischen Mittel pro Daumen folgendes Verteilungsmuster:

Quadrant	RK		VPK		MSP	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links
I	13 (1,63)	5 (0,71)	4 (0,50)	1 (0,14)	0	0
II	3 (0,38)	3 (0,43)	8 (1,00)	4 (0,57)	11 (1,38)	8 (1,14)
III	14 (1,75)	12 (1,71)	20 (2,50)	19 (2,71)	32 (4,00)	33 (4,71)
IV	4 (0,50)	9 (1,29)	6 (0,75)	0	2 (0,25)	8 (1,14)

Tabelle 3.6: Verteilung der RK, VPK und MSP in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe des MC, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

In 7 von 15 Präparaten wurde das metakarpale Mesotendineum angeschnitten. Im Gegensatz zum Vinculum breve führt es in allen Fällen von der dem Knochen abgewandten Seite und somit von palmar zur FPL-Sehne. In vier der sieben metakarpalen Mesotendinea sind RK zu finden, mit einer Gesamtzahl von fünf RK.



Abbildung 3.6: Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Pfeil markiert das metakarpale Mesotendineum.

Bei der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne auf mittlerer Höhe des MC ergab sich des weiteren folgendes Verteilungsmuster:

Lage	RK	
	rechts	links
im metakarpalen Mesotendineum	3 (0,38)	2 (0,29)
innerhalb der FPL Sehne	0	0
an der Sehnenscheide	3 (0,38)	5 (0,71)
sonstiger Bezug	0	0

Tabelle 3.7: Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe des MC in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

3.2.5 Querschnitt auf Höhe des CMC

12 der 15 Übersichtspräparate auf Höhe des CMC wurden für die Auswertung berücksichtigt. In den Präparaten sind dorsal die Sehnen des EPL, EPB, APL sowie palmar die des FPL und des M. flexor carpi radialis abgebildet. Darüber hinaus sind in manchen Präparaten Strukturen des Karpaltunnels angeschnitten (s. Abbildung 3.7). Auch Anteile des OPP und APB sind zu sehen.
Mesotendineum bildet sich in keinem der Präparate auf dieser Höhe ab. Aus diesem Grund wurde die Umgebung der FPL-Sehne in den Übersichtspräparaten auf Höhe des CMC nicht gesondert untersucht.

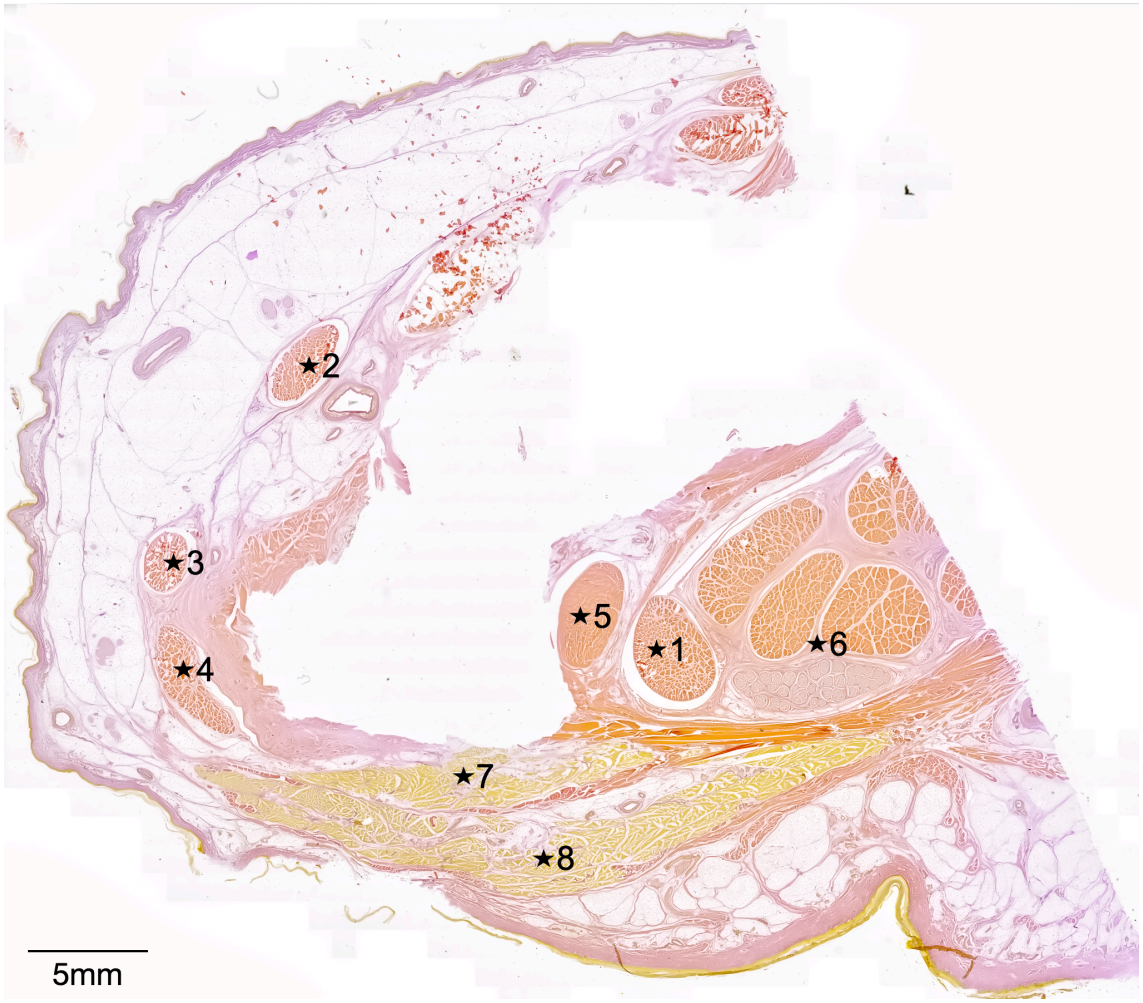


Abbildung 3.7: Querschnitt auf Höhe des CMC eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = Sehne des EPL, 3 = Sehne des EPB, 4 = Sehne des APL, 5 = Sehne des M. flexor carpi radialis, 6 = Karpaltunnel mit N. medianus und den Sehnen der Mm. flexores digitorum superficiales et profundum, 7 = OPP, 8 = APB

Betrachtet man die vier Quadranten der Querschnitte auf Höhe des CMC so ergibt sich in der Summe beziehungsweise im arithmetischen Mittel pro Daumen folgendes Verteilungsmuster:

Quadrant	RK		VPK		MSP	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links
I	3 (0,5)	7 (1,67)	2 (0,33)	0	0	0
II	0	0	0	0	0	0
III	3 (0,5)	0	1 (0,17)	0	0	0
IV	3 (0,5)	1 (0,17)	3 (0,5)	3 (0,5)	20 (3,33)	16 (2,67)

Tabelle 3.8: Verteilung der RK, VPK und MSP in den 12 Übersichtspräparaten auf Höhe des CMC, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert).

3.3 Ergebnisse der Validierungspräparate

Alle 16 Daumen, die zur Erstellung der Validierungspräparate bearbeitet wurden, wiesen makroskopisch ein Vinculum breve an der distalen PP bis über das IP auf. Dieses war stets mit der palmaren Platte verbunden. In 14 von 16 Daumen verlief das Vinculum breve durchgängig nach distal bis zum Ansatz der FPL-Sehne an der PD. In 2 Daumen führte es nicht bis zum Sehnenansatz, sondern endete auf Höhe des Gelenkspaltes (s. Abbildung 3.8).
Mikroskopisch sind, entsprechend der Präparation, die palmare Platte, das Vinculum breve sowie die Sehne des FPL abgebildet. In 15 von 16 Vincula breve konnten RK gefunden werden (s. Abschnitt 3.4).

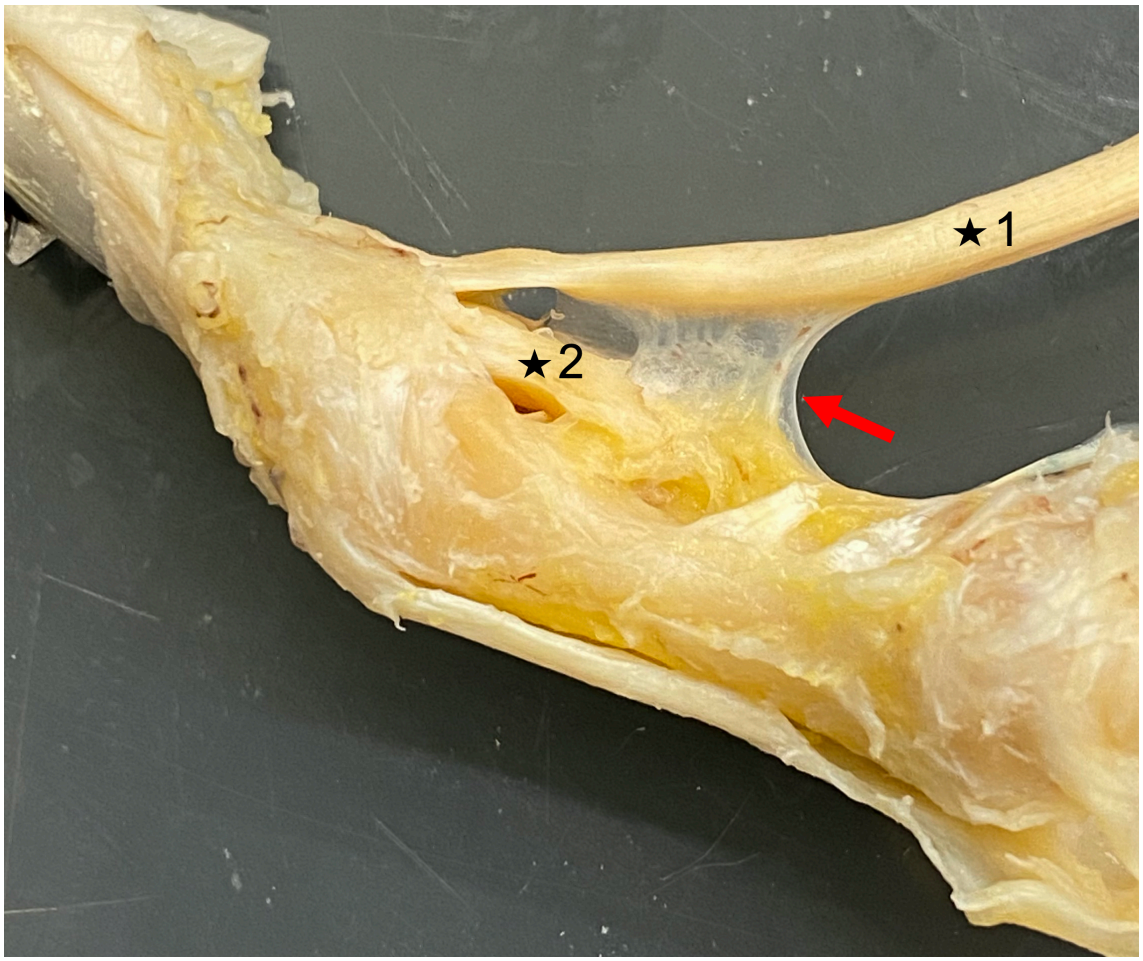


Abbildung 3.8: Freigelegtes Vinculum breve (roter Pfeil an dessen proximalem Rand) eines linken Daumens über der PP. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte. Das Vinculum breve setzt sich hier nicht bis zum Ansatz der FPL-Sehne fort.

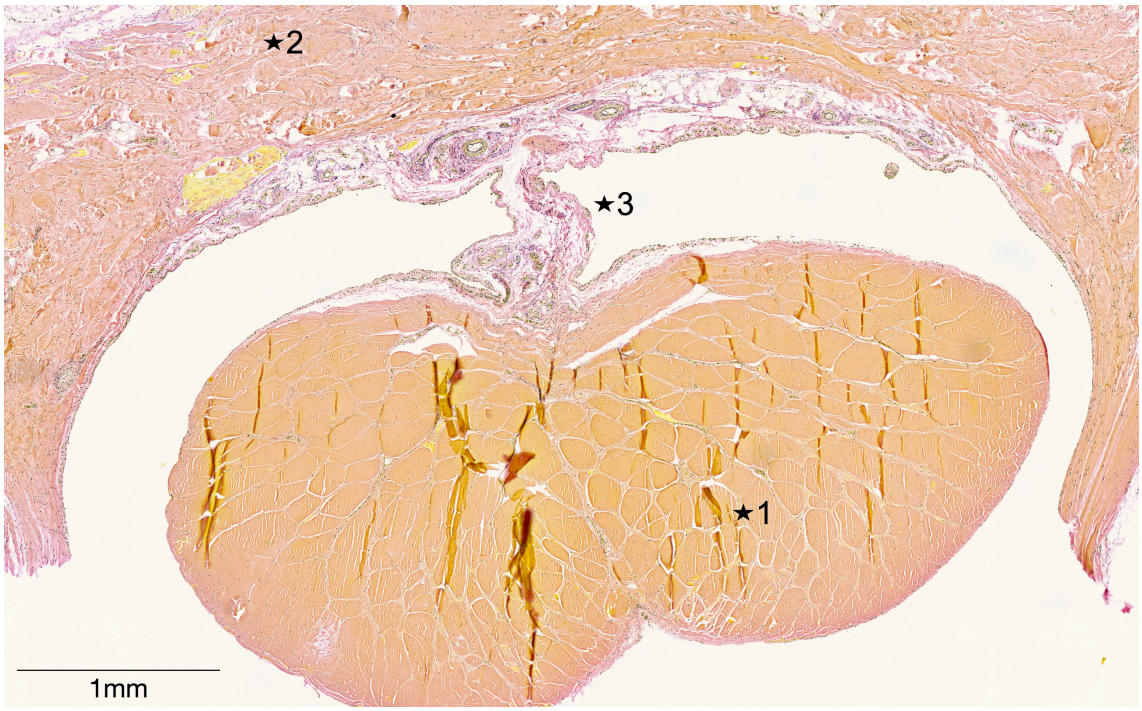


Abbildung 3.9: Histologisches Bild eines Validierungspräparates in ElHvG-Färbung. Anschnitt von proximal. Es zeigen sich die im Paket entnommenen Strukturen: 1 = FPL-Sehne, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve.

Auch in den Validierungspräparaten zeigte sich das Vinculum breve mit variabler Morphologie und bildete sich teils strangförmig, teils breitbasig ab.

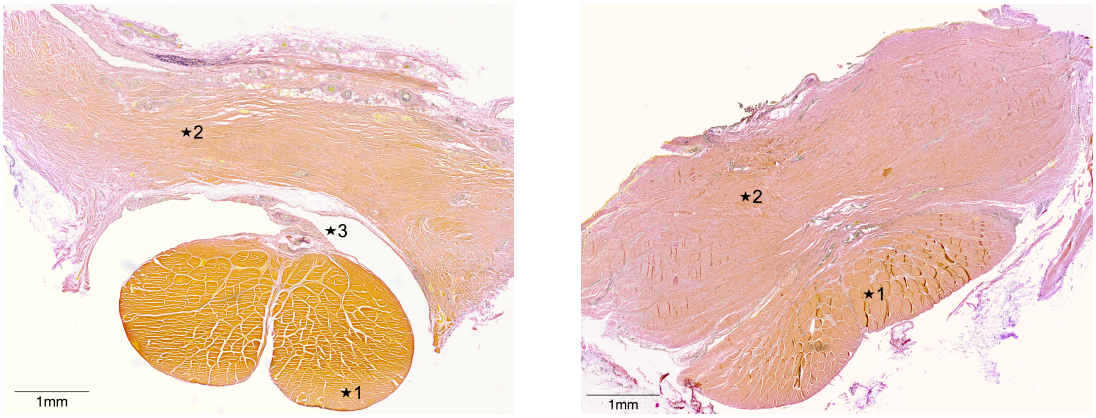


Abbildung 3.10: Beispiele für die unterschiedliche Morphologie, mit der das Vinculum breve in den Validierungspräparaten auftritt. ElHvG-Färbung. Anschnitt jeweils von proximal. 1 = FPL-Sehne, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. Im linken Bild präsentiert sich das Vinculum breve strangförmig, während es im rechten Bild breitbasig erscheint und sich in dieser Vergrößerung kaum von der palmaren Platte und der FPL-Sehne abgrenzen lässt.

3.4 Ruffini-Körperchen im Vinculum breve

3.4.1 Übersichtspräparate

Das Vinculum breve ist in allen 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des IP angeschnitten. In 13 von 15 (86,67%) der angeschnittenen Vincula breve auf Höhe des IP zeigten sich RK.

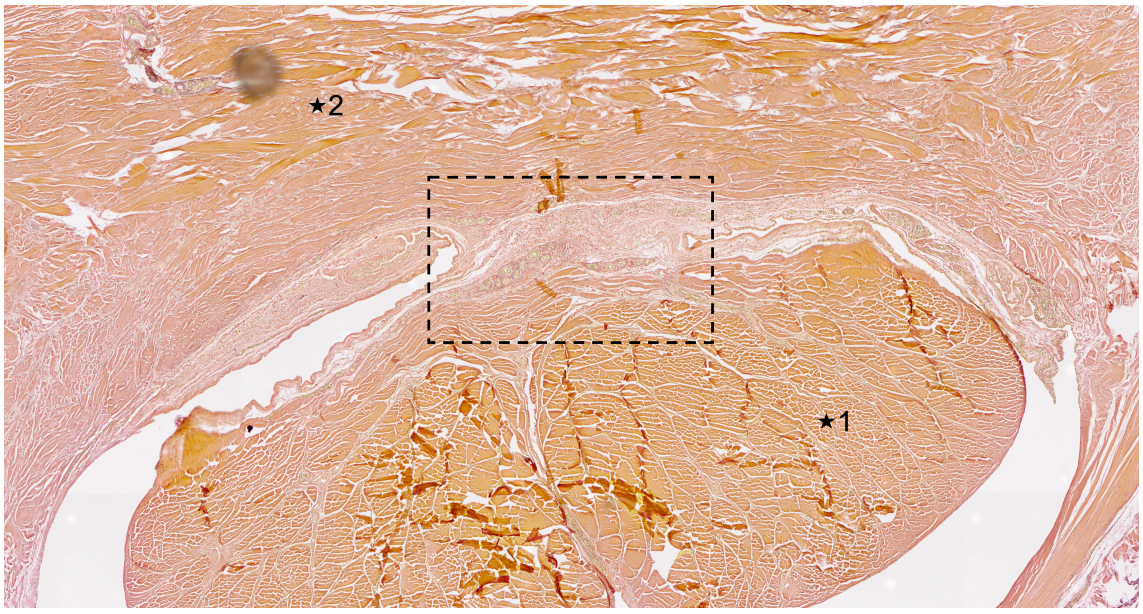


Abbildung 3.11: Übersicht über das Vinculum breve auf Höhe des Endgelenks eines rechten Daumens. Querschnitt. ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte. Der markierte Auschnitt ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

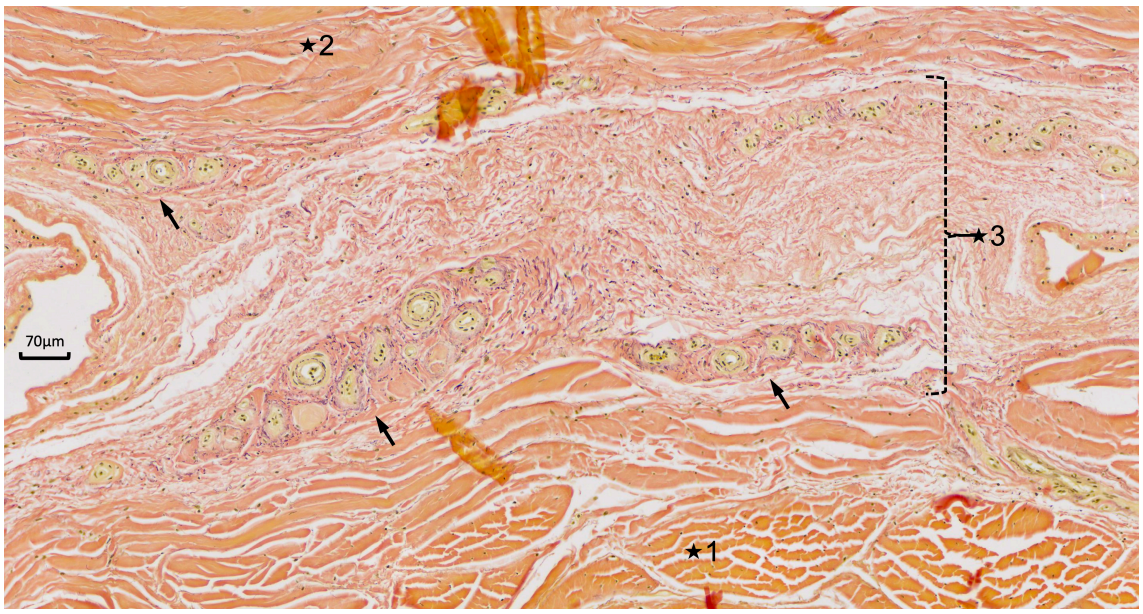


Abbildung 3.12: Ausschnitt aus Abbildung 3.11. Vinculum breve mit 3 Ruffini-Körperchen, welche mit Pfeilen markiert sind. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. Das Vinculum wird seitlich begrenzt durch die Umschlagsfalten des *Stratum synoviale* der Beugesehnenscheide.

Darunter weisen alle 8 Präparate eines rechten Daumens sowie 5 von 7 Präparaten eines linken Daumens RK auf. Beide Vincula breve ohne RK entstammen einer weiblichen Körperspende. In den 13 Vincula breve sind insgesamt 23 RK abgebildet. Daraus ergibt sich ein Durchschnitt von 1,53 RK pro Anschnitt des Vinculum breve. Maximal fanden sich vier RK in einem Anschnitt des Vinculum breve auf Höhe des IP. Teilt man die Daumen entsprechend ihrer Seite ein so sind in den Präparaten auf Höhe des IP der linken Daumen insgesamt neun RK, in denen der rechten Daumen insgesamt 14 RK innerhalb der Vincula breve abgebildet, was einem Durchschnitt von 1,29 (links) und 1,75 (rechts) entspricht. Auf mittlerer Höhe der PP ist das Vinculum breve in 4 von 15 Präparaten angeschnitten, wobei in einem einzigen Fall darin RK abgebildet sind.

3.4.2 Validierungspräparate

In 15 Vincula breve der 16 Validierungspräparate sind RK angeschnitten. Das entspricht 93,75%. Das Präparat, in dem keine RK dargestellt werden konnten, entstammt dem rechten Daumen einer männlichen Körperspende. Maximal wurden 3 RK in einem Anschnitt des Vinculum breve gefunden.

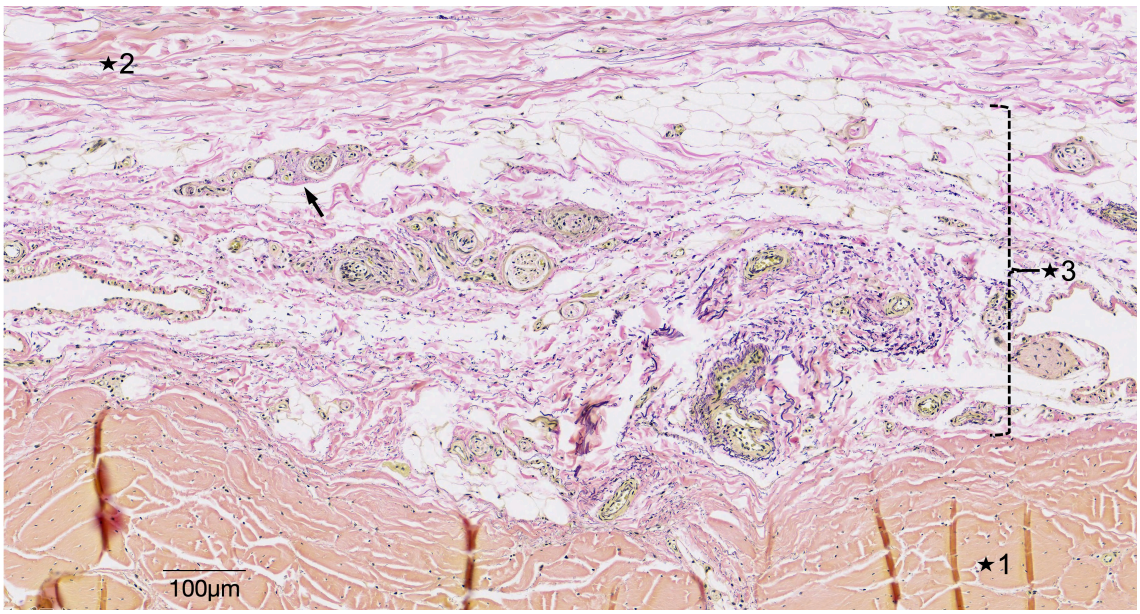


Abbildung 3.13: RK (mit Pfeil markiert) im Anschnitt des Vinculum breve aus einem Validierungspräparat eines linken Daumens. ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve.

3.4.3 Zusammenführung der Ergebnisse und statistische Auswertung

Aus den 15 Vincula breve in den Übersichtspräparaten auf Höhe des IP und den 16 Vincula breve in den Validierungspräparaten ergibt sich eine Gesamtzahl von 31 untersuchten Vincula breve, die quer angeschnitten in ElHvG-Färbung unter dem Lichtmikroskop untersucht wurden.

In 28 der 31 Vincula breve sind lichtmikroskopisch RK zu finden. Das entspricht einem gesamten Anteil von 90,32%.

Von den drei Vincula breve, in denen keine RK gefunden wurden, entstammen zwei der linken Körperhälfte einer weiblichen Körperspende und eine der rechten Körperhälfte einer männlichen Körperspende. Anhand des Chi-Quadrat-Tests nach Pearson ergibt sich kein signifikanter Unterschied im Auftreten von RK innerhalb des Vinculum breve abhängig von Körperhälfte (p=0,505) oder Geschlecht (p=0,583).

KAPITEL 4

Diskussion

Im Zuge dieser Arbeit wurden zunächst histologische Übersichtspräparate von fünf zuvor festgelegten Höhen an 15 Daumen erstellt. Anhand dieser Übersichtspräparate wurden die Mechanosensoren des Daumens lichtmikroskopisch kartografiert. Dabei zeigte sich eine Anhäufung von RK in den Vincula breve der Querschnitte auf Höhe des IP.

Um diese Beobachtung zu validieren, wurden anschließend gezielte histologische Präparate des Vinculum breve, im Paket mit der Sehne des FPL und der palmaren Platte, von weiteren 16 Daumen erstellt. Das Ergebnis bestätigte sich dabei.

Insgesamt konnten in 28 von 31 Vincula breve lichtmikroskopisch RK gefunden werden.

RK innerhalb des Vinculum breve des Daumens oder innerhalb des Mesotendineums anderer langer Sehnen des Körpers wurden bisher in der Literatur nicht beschrieben.

4.1 Ruffini-Körperchen im Vinculum breve

4.1.1 Ruffini-Körperchen und das Vinculum breve im Kontext der Literatur

Die Funktion des Vinculum breve, Blutgefäße und Nerven zur Sehne zu führen, wurde in der Literatur vielfach beschrieben [4, 5, 7, 48, 58, 66, 72, 106]. Es ist als Umschlagsfalte des *Stratum synoviale* der Sehnenscheide an seiner palmaren Seite unmittelbar mit der Beugesehne verbunden und an seiner dorsalen Seite an der palmaren Platte fixiert [4, 14]. Es ermöglicht die konstante Versorgung der Sehne mit Nährstoffen bei deren Bewegung, trotz der hohen Gleitamplitude von durchschnittlich 19,6mm, gemessen über dem MCPP [22]. Dabei folgt es unmittelbar den Bewegungen der FPL-Sehne, welche wiederum selbst bei den meisten aktiven und passiven Bewegungen des Daumens bewegt wird.
Dass RK als Dehnungssensoren innerhalb gelenknaher Bänder auftreten wurde bereits mehrfach in der Literatur beschrieben, zum Beispiel in den Bändern des Kniegelenks [23, 30, 50]. Der Nachweis von RK und anderen Mechanosensoren innerhalb der gelenknahen Bänder führte zu dem Konsens, dass den untersuchten Bändern, neben ihrer passiv mechanischen Funktion, auch eine sensorische Funktion als Teil der aktiven Stabilisierung von Gelenken zugeschrieben werden muss [9, 40, 50].

Es ist somit zu vermuten, dass die Ausscherungen des Vinculum breve, die bei Bewegungen der FPL-Sehne entstehen, zu einer Dehnung und somit Aktivierung der RK, die im Rahmen dieser Arbeit innerhalb des Vinculum breve dargestellt wurden, führen. Dies lässt auf eine unmittelbare Beteiligung des Vinculum breve an der Entstehung propriozeptiver Empfindungen des Daumens schließen.
Eine solche Funktion des Vinculum breve oder vergleichbarer Strukturen ist bislang nicht beschrieben worden.

4.1.2 Klinische Relevanz

Amadio et al. (1985) haben das postoperative outcome nach Beugesehnennaht bei Patienten mit Beugesehnenverletzungen in Zone 2 untersucht [3]. Zwei Gruppen wurden dahingehend unterschieden, ob im Zuge des Traumas die Vincula ebenfalls durchtrennt wurden oder intakt blieben [3]. Das postoperative outcome wurde mithilfe der *total active motion* in definierten Zeitabständen im Rahmen der Nachbehandlung objektiviert [3]. Dabei wiesen Patienten, dessen Vincula sich intraoperativ intakt zeigten, im postoperativen Verlauf eine signifikant höhere *total active motion* auf [3]. Die Autoren vermuten zum einen, dass intakte Vincula eine bessere Nährstoffversorgung der Beugesehnen und einen effektiveren Abtransport von Metaboliten gewährleisten können, um auf diese Weise zur besseren Genesung beizutragen [3]. Zum anderen führen die Autoren an, dass das ursprüngliche Trauma bei zusätzlicher Verletzung der Vincula in der Regel größer gewesen sein muss [3]. Einblutungen in die Sehnenscheide können nach Aussage der Autoren zu einer verstärkten Fibrosierung führen, welche ebenfalls Einfluss auf die Beweglichkeit des Fingers haben könnte [3]. Zudem erwähnen die Autoren, dass die operative Naht stark retrahierter Beugesehnen, ein Zustand der gerissene Vincula voraussetzt, einer größeren chirurgischen Invasivität bedarf [3]. Es ist zu berücksichtigen, dass die retrospektive Studie von Amadio et al. (1985) nicht zwischen dem Daumen und den Fingern 2-5 unterscheidet.

Röijezon, Clark und Treleaven (2015) fassen in ihrem zweiteiligen Artikel u.a. Gründe für veränderte Propriozeption, zu denen auch traumatische Veränderungen der Gewebe zählen, zusammen und diskutieren u.a. die Auswirkungen von eingeschränkter Propriozeption [27, 79]. Es könne dabei zu einem „nachteiligen Einfluss auf die motorische Rückkopplung und Steuerung sowie die Kontrolle des Muskeltonus“ [79] kommen, welche wiederum bedeutsam für die „Präzision von Bewegungen, Gelenkstabilität und Koordination“ [79] seien [79]. Mit dem Verweis auf weitere Studien führt der Autor an, dass eingeschränkte Propriozeption das Risiko von Verletzungen einerseits erhöhen [105], gezieltes Training zur Verbesserung der propriozeptiven Fähigkeiten andererseits das Verletzungsrisiko senken könne [49, 79]. Röijezon et al. (2015) folgern daraus, dass „die Propriozeption betreffende Maßnahmen sowohl zur Prävention als auch zur Rehabilitation muskuloskelettaler Störungen relevant sind“ [79].

Die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten RK innerhalb des Vinculum breve des Daumens schaffen die Grundlage, eine weitere Ursache für das von Amadio et al. (1985) beschriebene verschlechterte postoperative outcome in einer propriozeptiven Funktion des Vinculums zu sehen.
Ein durchtrenntes Vinculum breve mit darin befindlichen RK könnte nicht mehr, oder nur noch eingeschränkt, zur Entstehung einer propriozeptiven Empfindung beitragen. Dementsprechend könnten, im Kontext der Publikation von Röijezon, Clark und Treleaven (2015), auch die sensomotorischen Fähigkeiten des Daumens eingeschränkt bleiben[79].

Das Vinculum breve des Daumens als propriozeptive Einheit zu sehen kann somit als neuer Ansatzpunkt in der Therapie und Nachbehandlung von Krankheiten oder Verletzungen des Daumens dienen.

4.2 Diskussion der Methodik

4.2.1 Körperspenden

Die Körperspenden waren zum Zeitpunkt ihres Todes zwischen 64 und 106, im Durchschnitt 80,18 Jahre alt.
Eine Studie an Daumen jüngerer Probanden könnte zu einem unterschiedlichen Ergebnis führen, da sich die Gewebe des Körpers während des Alterungsprozesses verändern. Jüngere Körperspenden werden in Deutschland jedoch selten verzeichnet, sodass eine Studie mit einer entsprechend hohen Anzahl an Daumen von jüngeren Probanden in ihrer Durchführung als schwer realisierbar zu betrachten ist.

Die Händigkeit der Körperspenderinnen und -spender wird prämortal nicht registriert. Bei dem Vergleich von Daumen der rechten und linken Körperhälfte muss daher vom Bevölkerungsdurchschnitt ausgegangen werden. Nach Angaben innerhalb der Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (Stand 11/2014) liegt der Anteil an Linkshändern/-innen in der Bevölkerung bei 10-15% [1].

4.2.2 Präparation

Die in Unterabschnitt 2.5.1 beschriebene Präparation eignete sich nicht zur Kartografierung der Mechanosensoren. Durch das circuläre Ablösen der Weichteile vom Knochen wurden die Gewebeschichten zu stark gegeneinander verschoben, sodass die Lagebeziehungen einzelner Strukturen zueinander nicht mehr eindeutig nachvollziehbar waren. Da die palmaren und dorsalen Weichteile bei dieser Vorgehensweise getrennt werden mussten, entstanden darüber hinaus radial- und ulnarseitige Schnittkanten, in denen Propriosensoren verloren gingen. Die histologischen Präparate konnten somit nicht als vollständige Übersicht dienen und wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.
Um ungeteilte Querschnitte der gewählten Höhen zu erhalten, wurde daraufhin die in Unterabschnitt 2.5.2 beschriebene Vorgehensweise erstellt und angewandt. Diese Übersichtspräparate wiesen die gewünschten Eigenschaften auf. Im tiefgefrorenen Zustand bleibt das Gewebe während des Sägens stabil, Verschiebungen einzelner Schichten oder Strukturen gegeneinander treten nicht auf. Gefrier-Artefakte waren nicht zu erkennen.
Zur Bearbeitung mit der Metallbandsäge müssen die Daumen fest in die Haltevorrichtung eingespannt werden. Dies kann den Daumen beschädigen.
So wurden daraufhin, wie in Unterabschnitt 2.5.3 erläutert, ganze Hände verwendet, um diese über den Hypothenar in der Metallbandsäge zu fixieren, sodass keine Beschädigungen am Daumen auftreten.
Zur Markierung der Schnitthöhen wurde erwogen, einen Bildwandler zur Hilfe zu nehmen. Durch das schrittweise Vorgehen von proximal nach distal konnten die gewünschten Schnitthöhen jedoch auch ohne Markierung zuverlässig getroffen werden. Um die Strahlenexposition zu vermeiden wurde daher gegen den Einsatz eines Bildwandlers entschieden.

Die Abbildung 4.1 zeigt den Querschnitt eines linken Daumens auf mittlerer Höhe des MC in makroskopischer Ansicht (links) und das daraus angefertigte histologische Präparat (rechts). Die makroskopisch sichtbaren Strukturen lassen sich bereits auf den ersten Blick im histologischen Schnitt wiederfinden, da die Topografie nicht verändert wurde. Dies verdeutlicht die Präzision, mit der die histologischen Übersichtspräparate durch die ausgearbeitete Methodik erstellt werden konnten.



Abbildung 4.1: Makroskopischer und mikroskopischer Querschnitt durch den Daumenballen auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens. Ansicht jeweils von proximal. Mikroskopisches Präparat in ElHvG-Färbung.

Die so gefertigten Übersichtspräparate zeigten sich gut geeignet zur Erstellung einer histologischen Landkarte der Mechanosensoren. Um gezielt einzelne Strukturen abzubilden, ist diese Vorgehensweise jedoch zu aufwändig.

Die gezielte Darstellung des Vinculum breve und dessen Entnahme in einem Paket mit FPL-Sehne und palmarer Platte stellte eine geeignete Vorgehensweise zur Validierung der Ergebnisse dar. Da das Vinculum breve eine hohe mechanische Stabilität aufweist, ist es nicht anfällig für Beschädigungen bei der Präparation. Die palmare Platte und der Ansatz der Sehne des FPL ließen sich leicht aus dem umliegenden Gewebe lösen.

4.2.3 Entkalkung oder manuelle Entfernung der Knochen

Das Mikrotom kann unbehandelten Knochen nicht schneiden. Das Messer wird durch kalzifizierten Knochen beschädigt. Die daraus entstehenden Artefakte schließen eine aussagekräftige histologische Untersuchung aus. Um dies zu verhindern, bestehen zwei Möglichkeiten, die Präparate zuvor zu bearbeiten.
Zum einen können die knöchernen Strukturen in einem chemischen Verfahren entkalkt werden. Alternativ können die knöchernen Bestandteile manuell entfernt werden. Die chemische Entkalkung hat den Vorteil, dass die Präparate topografisch unverändert und unbeschädigt bleiben. Jedoch können manche gängigen immunhistochemischen Verfahren anschließend nicht mehr auf die entkalkten Proben angewendet werden. Zudem handelt es sich bei der Entkalkung um ein sehr zeitaufwändiges Verfahren. Durch die manuelle Präparation lassen sich die knöchernen Bestandteile der Präparate aus den meisten der fünf gewählten Höhen mit geringem Zeitaufwand entfernen, ohne relevanten Schaden am später histologisch zu untersuchenden Weichteilgewebe zu verursachen. Insbesondere die Entfernung der Knochenschäfte aus den Querschnitten auf mittlerer Höhe des PP und MC ist problemlos durchführbar (s. Abbildung 4.1). Auch auf Höhe des IP zeigten die nach diesem Verfahren erstellten histologischen Präparate eine sehr gute Qualität. Zur Erstellung von Querschnitten auf Höhe des MCPP ist diese Methode jedoch weniger geeignet, da sich die Ossa sesamoidea nicht ohne Kollateralschäden am umliegenden Weichgewebe entfernen lassen.

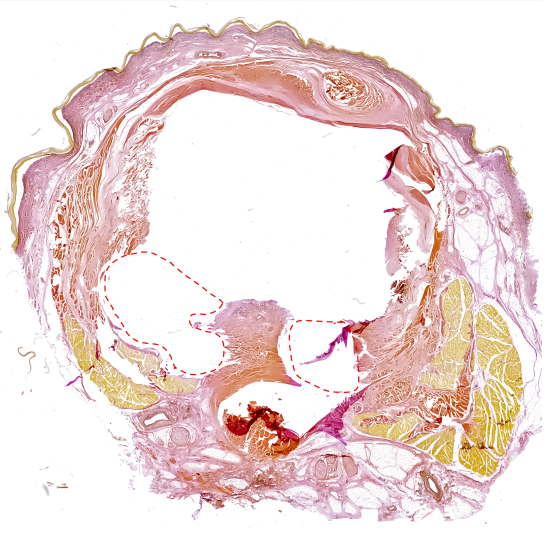


Abbildung 4.2: Bespiel eines artefaktreichen Präparates auf Höhe des MCPP, nachdem die *Ossa sesamoidea* (gestrichelte rote Linien) entfernt wurden

Die manuelle Entfernung der Knochen ist ausgeprägt untersucherabhängig.
Da nach Entkalkung nicht alle immunhistochemischen Verfahren mehr auf die Proben angewandt werden können, wurde dieses Verfahren ausgeschlossen. Auch wenn letztendlich im Rahmen dieser Arbeit keine immunhistochemische Färbung angewandt wurde, so sind die Übersichtspräparate noch für weitere Studien auch unter Anwendung immunhistochemischer Färbungen nutzbar.

4.2.4 Färbung

Bei der ElHvG-Färbung handelt es sich um eine kostengünstige und zeitlich unaufwändige Methode. Alle im Zuge dieser Arbeit zu untersuchenden Strukturen werden dabei gut differenzierbar angefärbt. Insbesondere Kollagen- und elastische Fasern lassen sich eindeutig voneinander unterscheiden, was einen Vorteil gegenüber vergleichbaren Standardfärbungen (z.B. Hämatoxylin-Eosin) darstellt [65].

4.2.5 Auswertung

Als Grundlage für die lichtmikroskopische Identifikation der RK dienten in erster Linie die Beschreibungen von Halata et al. (1985) aus einer Studie zu RK des menschlichen Knies [45]. Die in der Literatur häufig zitierte Charakterisierung der Nervenendigungen von Freeman und Wyke (1967) hingegen bezieht sich zum einen auf Körperchen innerhalb des Kniegelenks der Katze, zum anderen wurden spezielle Färbungen, wie z.B. Goldchlorid, verwendet. In histologischen Standardfärbungen wie dem hier verwendeten ElHvG lassen sich die morphologischen Beschreibungen von Halata et al. (1985) deutlicher nachvollziehen. Es werden sowohl die Kollagenfasern, die eingelagerten Gefäße, die Nervenfasern sowie, wenn vorhanden, die Kapsel der RK in ihrer von Halata et al. (1985) beschriebenen Konfiguration deutlich dargestellt [45].

Die Alternative zur digitalen Auswertung stellt die analoge Untersuchung am klassischen Lichtmikroskop dar. Die topografische Erfassung der Mechanosensoren ist dabei jedoch weniger genau und zudem aufwändiger.
Der Mikroskop-Scanner kann die Präparate mit bis zu 80-facher Vergrößerung digitalisieren. Die zu untersuchenden Strukturen können direkt digital markiert werden, bei Bedarf können auch Anmerkungen des Untersuchers unmittelbar an der entsprechenden Struktur platziert werden. Die Auswertung kann an jedem Computer erfolgen.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

4.3.1 Ergebnisse der Übersichtspräparate

Die Auswertung der Übersichtspräparate nach Quadranten diente der Erstellung einer topografischen Karte, die genutzt wurde um bisher unbekannte Zusammenhänge darzustellen.
Die Einteilung nach Quadranten dient dabei lediglich der Übersicht. Es wird nicht berücksichtigt innerhalb welcher oder an welchen Strukturen sich die Mechanosensoren befinden. So kann ein Mechanosensor, der in Quadrant I (dorsal) registriert wird, sowohl in der Dermis als auch an einer Strecksehne bzw. der Dorsalaponeurose liegen.
Aus diesem Grund wurde zunächst auch eine Erfassung der Topografie der Mechanosensoren in Bezug auf funktionelle Einheiten in Erwägung gezogen. Dabei wäre ein Mechanosensor aufgrund seiner Lagebeziehung z.B. der Dorsalaponeurose oder den Gefäß-Nervenbündeln zugeordnet worden.
Dies hätte jedoch bedeutet, dass die Sensoren bereits nach zuvor subjektiv vom Untersucher festgelegten Systemen vorsortiert werden. Die Erfassung der Mechanosensoren nach Quadranten gewährleistet somit eine höhere Objektivität und eignet sich besser zur Erstellung einer unvoreingenommenen „Landkarte“.

Querschnitt auf Höhe des IP

In den 15 Querschnitten auf Höhe des IP zeigte sich eine Häufung von RK in den Quadranten I und III und somit dorsal- und palmarseitig des Gelenks. In Quadrant I waren an rechten Daumen im Durchschnitt 2,63 und an linken Daumen 2,57 RK abgebildet. In Quadrant III zeigten sich rechts im Durchschnitt 2,50 und links 1,86 RK. In den ulnaren und radialen Quadranten II und IV wurden rechts jeweils durchschnittlich 0,38 RK registriert, links im Quadranten II 0,14 und im Quadranten IV 0,29.
Die Beobachtungen sind in Einklang zu bringen mit den Beschreibungen von Taylor (2009), die dehnungsabhängige SA-II-Rezeptoren als federführend für die Erfassung der Gelenkposition bei Dehnung der Haut über dem entsprechenden Gelenk auf der einen und gleichzeitiger Kompression der Haut auf der anderen Seite des Gelenks sieht [96].
Da am IP als reines Scharniergelenk [16, 81] bei Bewegung die Haut über der ulnaren und radialen Seite des Gelenks weniger gespannt bzw. komprimiert wird, fügt sich auch das geringere Auftreten von RK in den Quadranten II und IV in den Kontext der Beschreibungen von Taylor (2009) ein [96].

VPK sind gemäß ihrer Funktion als Sensoren zur Detektion von Vibrationen und Druckveränderungen [92], z.B. beim Greifen und Loslassen von Gegenständen [92], überwiegend im palmaren Quadranten III mit durchschnittlich 2,50 (rechts) und 5,29 (links) abgebildet. Auch bei den VPK findet sich eine nur geringere Anzahl in den ulnaren und radialen Quadranten II sowie IV mit durchschnittlich 0,38 (rechts) und 0,29 (links) in Quadrant II sowie 0,38 (rechts) und 0,43 (links) in Quadrant IV. Da die Kontaktfläche mit berührten Gegenständen von palmar aus gesehen nach lateral und schließlich nach dorsal weniger wird, passen auch diese Ergebnisse in den Kontext der Funktion der VPK. Auch im dorsalen Quadranten I sind nur vereinzelt VPK abgebildet, durchschnittlich 0,14

rechts und 0,71 links.

In den Querschnitten auf Höhe des IP wurde das Vinculum breve stets angeschnitten. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Armenta et al. (1984). Nach den Beschreibungen des Autors befindet sich das Vinculum breve am distalen Drittel der PP und verläuft über das IP, um sich in 82% der Fälle bis zum Ansatz der Sehne des FPL fortzusetzen [4].

In der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne auf Höhe des IP zeigten sich die RK vermehrt innerhalb des Vinculum breve. Des Weiteren ergab sich dabei kein kennzeichnendes Verteilungsmuster.

Querschnitt auf mittlerer Höhe der PP

Auf mittlerer Höhe der PP ergibt sich ein ähnliches Verteilungsmuster der RK und VPK wie auf Höhe des IP.
So treten die RK in den dorsalen und palmaren Quadranten I (1,5 rechts, 1,29 links) und III (1,38 rechts, 1,86 links) im Durchschnitt häufiger auf als in den ulnaren und radialen Quadranten II (0,5 rechts, 0,43 links) und IV (0,13 rechts, 0 links).

Die VPK häufen sich auch auf mittlerer Höhe der PP im palmaren Quadranten III (im Durchschnitt 4,63 rechts und 4,43 links) und treten in den Quadranten I (0,13 rechts, 0,29 links) und II (0,5 rechts, 1,14 links) seltener auf.

Auch diese Verteilungen können im Kontext der in Unterunterabschnitt 4.3.1.1 genannten Literatur gesehen werden.

Auf mittlerer Höhe der PP ist das Vinculum breve nur in 4 der 15 Präparate angeschnitten. Dies lässt sich mit den Beschreibungen von Armenta et al. (1984), dass das Vinculum breve am distalen Drittel der PP zu finden ist, in Einklang bringen [4]. Da die Mitte des MC mit der erarbeiteten Methodik mit kleinen Abweichungen getroffen wird, ist davon auszugehen, dass in diesen Fällen die PP etwas weiter distal angeschnitten wurde.

In der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne ergab sich auf mittlerer Höhe der PP kein kennzeichnendes Verteilungsmuster.

Querschnitt auf Höhe des MCPP

Die Übersichtspräparate auf Höhe des MCPP zeigten sich zum Teil mit Artefakten, die auch durch Wiederholung des Anschnitts mit 500 µm Versatz nach distal nicht verbessert werden konnten. Sie gingen auf die mechanische Beanspruchung des Weichgewebes bei der Entfernung der knöchernen Strukturen zurück, was sich auf dieser Höhe aufgrund der zu entfernenden *Ossa sesamoidea* am schwierigsten gestaltete. Die 12 ausgewerteten Präparate setzten sich aus 7 rechten und 5 linken Daumen zusammen. Auf ihnen bilden sich in Quadrant I im Durchschnitt 2,71 (rechts) und 1,0 (links) RK ab. VPK oder MSP wurden in Quadrant I nicht gefunden. Im gegenüberliegenden Quadranten III zeigten sich im Durchschnitt rechts 1,43 und links 1,20 RK, 1,43 (rechts) und 2,80 (links) VPK sowie keine (rechts) und 0,60 (links) MSP. Auch auf Höhe des MCPP wiesen die ulnaren und radialen

Quadranten II und IV seitenunabhängig im Durchschnitt weniger als ein RK auf. Die VPK zeigten sich hier ebenfalls seltener als palmar. MSP waren ulnar und radial nicht zu finden.

Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC

Auch auf mittlerer Höhe des MC finden sich die meisten Mechanosensoren beugeseitig. Dabei sind in Quadrant III RK im Vergleich mit durchschnittlich 1,75 (rechts) bzw. 1,71 (links) seltener vorhanden als die weiteren Mechanosensoren. Häufiger zeigen sich VPK im beugeseitigen Quadranten, mit im Durchschnitt 2,50 (rechts) und 2,71 (links). Aufgrund des großen Anteils an Muskelgewebe im gesamten Präparat lassen sich schließlich auch die MSP in Quadrant III am häufigsten auffinden, mit durchschnittlich 4,00 (rechts) und 4,71 (links).

In der Auswertung der Umgebung der FPL-Sehne auf mittlerer Höhe des MC ergab sich kein kennzeichnendes Verteilungsmuster.

Querschnitt auf Höhe des CMC

Auf Höhe des CMC zeigte sich die Gesamtzahl der Mechanosensoren zu gering, um ein aussagekräftiges Verteilungsmuster erkennen zu lassen.

4.3.2 Ergebnisse der Validierungspräparate

Während die Mechanosensoren innerhalb der Übersichtspräparate auch quantitativ erfasst wurden, erfolgte die Auswertung der Validierungspräparate rein qualitativ. Für das Ergebnis wurde somit nur berücksichtigt, ob im Vinculum breve eines Präparates RK gefunden wurden oder nicht. Auf diese Weise konnten die entsprechenden Ergebnisse der Validierungspräparate ohne Einschränkungen mit denen der Übersichtspräparate gleichgesetzt werden.

4.3.3 Morphologie des Vinculum breve

Die unterschiedliche Morphologie des Vinculum breve in den Übersichts- und Validierungspräparaten kann auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sein.
In den Übersichtspräparaten ist es möglich, dass das Vinculum breve auf unterschiedlichen Höhen von proximal nach distal getroffen ist. Die Vincula breve, die sich wie in Unterabschnitt 3.2.1 beschrieben eher breitbasig präsentieren, sind a.e. weiter distal, kurz vor dem Ansatz der FPL-Sehne am PD, angeschnitten. Bei der Präparation der Validierungspräparate war bereits makroskopisch zu sehen, dass sich das Vinculum breve in Bereichen, die Gefäße enthalten, deutlich dicker präsentiert als in gefäßfreien Bereichen (s. Abbildung 4.3). Dort kann es so dünn sein, dass es nahezu durchsichtig erscheint. Auch dies kann eine Erklärung für die unterschiedliche Morphologie bieten, mit der sich das Vinculum breve in den histologischen Präparaten darstellt. 14 der 16 Vincula breve führten durchgängig bis zum Ansatz der FPL-Sehne, was sich ebenfalls mit den Beobachtungen von Armenta und Fisher (1984) in Einklang bringen lässt [4].



Abbildung 4.3: Vinculum breve eines linken Daumens mit palmarer Platte und ansatznaher FPL-Sehne. Die gefäßfreien Bereiche sind nahezu durchsichtig.

4.4 Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in 90,32% der 31 untersuchten Vincula breve des Daumens RK gefunden. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied im Bezug auf Daumen der linken oder rechten Körperhälfte oder im Bezug auf Daumen von Körperspenden des weiblichen oder männlichen Geschlechts.

Das Vorliegen von RK im Vinculum breve legt die Vermutung nahe, dass das Vinculum breve an der Erfassung des Lage-, Bewegungs-, Stellungs- und Kraftsinns des Daumens beteiligt ist.
Verletzungen oder Erkrankungen des Vinculum breve könnten daher zu einer eingeschränkten sensomotorischen Funktion des Daumens führen.

Eine Beteiligung des Vinculum breve des Daumens an der Entstehung propriozeptiver Epmfindungen ist bislang nicht beschrieben worden.

Bei den Ergebnissen dieser Arbeit handelt es sich um histologische Beobachtungen. Die RK wurden morphologisch innerhalb der Vincula breve dargestellt.
Der Beweis, dass die RK innerhalb des Vinculum breve bei Bewegungen der FPL-Sehne tatsächlich aktiviert werden, kann allein histologisch nicht erbracht werden. Dies könnte im Rahmen einer physiologischen Studie anhand von Ableitungen weiter untersucht werden.

Danksagung

Mein großer Dank gehört zunächst meinem stets verfügbaren Ansprechpartner Prof. Dr. Timm J. Filler für die ausgezeichnete Betreuung in freundschaftlicher Atmosphäre.

Besonderer Dank gilt auch dem Laborteam, Andrea Paas und Robert Kubitza, die nicht nur mit professioneller Unterstützung zur Seite stehen, sondern mit ihrer freundlichen Art auch schwierige Labortage angenehm werden lassen.

Gleiches gilt für die Präparatoren/Präparatorinnen, Sabine Wittschonnke, Yvonne Möller und Marco Warten, mit dessen Unterstützung die Arbeit an den Körperspenden überhaupt erst möglich wird.

Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei Christine Opfermann-Rüngeler, deren umfangreiche Expertise zur Erstellung medizinischer Grafiken beeindruckend ist.

Für den technischen Support möchte ich mich darüber hinaus bei Dennis Malenica und Patrick Brzoska bedanken.

Linus Krüger

Abbildungsverzeichnis

1.1 Querschnitte auf mittlerer Höhe des PP (links) und auf Höhe des IP (rechts). 1 = *„oblique pulley“*, 2 = palmare Platte unterhalb des Köpfchens des PP . 5

1.2 Die Bilder zeigen Querschnitte eines linken Daumens (linkes Bild) und eines rechten Daumens (rechtes Bild) auf Höhe des IP. Ansicht jeweils von proximal. 1 = *A. ulnodorsalis pollicis*, 2 = *A. radiodorsalis pollicis*, 3 = *A. ulnopalmaris pollicis*, 4 = *A. radiopalmaris pollicis*. Im rechten Bild (ElHvG-Färbung) ist der gemeinsame Verlauf der Arterien mit den *Nervi digitales palmares proprii et dorsales* gut zu erkennen. 6

1.3 Der Pfeil markiert den Anschnitt des metacarpalen Mesotendineums in einem Querschnittspräparat auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens. Es tritt von palmar an das Hilum der FPL-Sehne heran. ElHvG-Färbung. 8

1.4 Vinculum breve eines linken Daumens über der PP. Es ist an der dem Knochen zugewandten Seite mit der palmaren Platte verbunden und führt zum Hilum der Sehne. 9

1.5 Schematische Darstellung eines Ruffini-Körperchens in unmittelbarer Lagebeziehung zu einer Sehne. 13

1.6 Vater-Pacini-Körperchen in Elastica-Hämatoxylin-van-Gieson-Färbung (links) und als Schemazeichnung (rechts). Gut erkennbar ist das zentral liegende blanke Axonende und die mehrschichtige Kapsel aus Perineuralzellen [13, 64, 92]. 15

1.7 Axial angeschnittene Muskelspindel in ElHvG-Färbung. Gut zu erkennen ist die intrafusale Muskulatur (gelb) im Inneren des Sensors. 16

2.1 Die fünf Entnahmeebenen zur Erstellung der Übersichtspräparate. Schwarz: Carpometacarpalgelenk (CMC), Grau: mittlere Höhe des Os metacarpale I (MC), Grün: Metacarpophalagealgelenk (MCPP), Blau: Mitte der Phalanx proximalis (PP), Rot: Interphalangealgelenk (IP) 19

2.2 Abgetrennter rechter Daumen mit Os trapezium bei in Formaldehyd fixierter Körperspende 20

2.3 Querschnitte auf Höhe des IP eines linken Daumens vor (links) und nach (rechts) Entfernung des Köpfchens der PP und der Basis der PD 21

2.4 Beispiele der Erstellung der Übersichtspräparate. Die Hände sind über den *Hypothenar* in die Metallbandsäge eingespannt. Links: Blick von oben. Rechts: Blick von schräg vorn. 22

2.5 Freigelegtes Vinculum breve (roter Pfeil an dessen proximalem Rand) eines linken Daumens über der PP. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte . . . 23

2.6 Bild des entnommenen „Pakets“ aus dem distalen Anteil der Sehne des FPL, dem Vinculum breve und der palmaren Platte. 23

2.7 Beispiel der digitalen Auswertung der Übersichtspräparate. Querschnitt eines linken Daumens auf mittlerer Höhe der PP. Ansicht von proximal. ElHvG-Färbung. Das Präparat wird durch die gestrichelten Linien, welche sich an den 4 Gefäß-/Nervenbündeln orientieren, in 4 Quadranten geteilt. Die Markierungen liegen jeweils Nahe eines VPK (rot) und genau dorsal eines RK (blau). 29

2.8 Beispiel der digitalen Auswertung der Übersichtspräparate. Querschnitt eines rechten Daumens auf mittlerer Höhe des MC. Ansicht von proximal. ElHvG-Färbung. Das Präparat wird durch die senkrecht zueinander stehenden gestrichelten Linien in 4 Quadranten geteilt. Sie orientieren sich an den Strecksehnen des Daumens und der Sehne des FPL. Die Markierungen (rot) kennzeichnen beispielhaft einige VPK. 30

3.1 Querschnitt auf Höhe des IP eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Dorsalaponeurose, 4 = Lig. collaterale radiale, 5 = palmares Gefäß-/Nervenbündel mit A. radiopalmaris pollicis und N. palmaris digitalis proprii 34

3.2 Die Bilder zeigen Beispiele für die unterschiedliche Morphologie des Vinculum breve (durch Pfeile markiert) in den histologischen Präparaten auf Höhe des IP. 35

3.3 Querschnitt auf mittlerer Höhe des PP eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Knochen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = *oblique pulley*, 3 = Dorsalaponeurose, 4 = A. ulnodorsalis pollicis, 5 = palmares Gefäß-/Nervenbündel mit A. ulnopalmaris pollicis und N. palmaris digitalis proprii 37

3.4 Querschnitt auf Höhe des MCPP eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Sehne des EPL, 4 = Sehne des EPB, 5 = Lig. collaterale ulnare, 6 = A. ulnopalmaris und radiopalmaris pollicis, 7 = entfernte Ossa sesamoidea 39

3.5 Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Knochen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = Sehne des EPL mit akzessorischer Sehne, 3 = Sehne des EPB, 4 = A. princeps pollicis. Abgebildete Muskulatur von rechts im Uhrzeigersinn: M. interosseus dorsalis I, ADP, FPB, OPP, APB 41

3.6 Querschnitt auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Der Pfeil markiert das metakarpale Mesotendineum. 42

3.7 Querschnitt auf Höhe des CMC eines rechten Daumens, ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. Die knöchernen Strukturen wurden entfernt. 1 = Sehne des FPL, 2 = Sehne des EPL, 3 = Sehne des EPB, 4 = Sehne des APL, 5 = Sehne des M. flexor carpi radialis, 6 = Karpaltunnel mit N. medianus und den Sehnen der Mm. flexores digitorum superficiales et profundum, 7 = OPP, 8 = APB 44
3.8 Freigelegtes Vinculum breve (roter Pfeil an dessen proximalem Rand) eines linken Daumens über der PP. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte. Das Vinculum breve setzt sich hier nicht bis zum Ansatz der FPL-Sehne fort. . 46
3.9 Histologisches Bild eines Validierungspräparates in ElHvG-Färbung. Anschnitt von proximal. Es zeigen sich die im Paket entnommenen Strukturen: 1 = FPL-Sehne, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. 47
3.10 Beispiele für die unterschiedliche Morphologie, mit der das Vinculum breve in den Validierungspräparaten auftritt. ElHvG-Färbung. Anschnitt jeweils von proximal. 1 = FPL-Sehne, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. Im linken Bild präsentiert sich das Vinculum breve strangförmig, während es im rechten Bild breitbasig erscheint und sich in dieser Vergrößerung kaum von der palmaren Platte und der FPL-Sehne abgrenzen lässt. 47
3.11 Übersicht über das Vinculum breve auf Höhe des Endgelenks eines rechten Daumens. Querschnitt. ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte. Der markierte Auschnitt ist in Abbildung 3.12 dargestellt. 48
3.12 Ausschnitt aus Abbildung 3.11. Vinculum breve mit 3 Ruffini-Körperchen, welche mit Pfeilen markiert sind. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. Das Vinculum wird seitlich begrenzt durch die Umschlagsfalten des *Stratum synoviale* der Beugesehnenscheide. 48
3.13 RK (mit Pfeil markiert) im Anschnitt des Vinculum breve aus einem Validierungspräparat eines linken Daumens. ElHvG-Färbung. Ansicht von proximal. 1 = Sehne des FPL, 2 = palmare Platte, 3 = Vinculum breve. 49

4.1 Makroskopischer und mikroskopischer Querschnitt durch den Daumenballen auf mittlerer Höhe des MC eines linken Daumens. Ansicht jeweils von proximal. Mikroskopisches Präparat in ElHvG-Färbung. 55
4.2 Bespiel eines artefaktreichen Präparates auf Höhe des MCPP, nachdem die *Ossa sesamoidea* (gestrichelte rote Linien) entfernt wurden 56
4.3 Vinculum breve eines linken Daumens mit palmarer Platte und ansatznaher FPL-Sehne. Die gefäßfreien Bereiche sind nahezu durchsichtig. 61

Tabellenverzeichnis

1.1 Übersicht über die Muskeln des Thenars, abgeleitet aus: Benninghoff, Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem, Band 1, 17. Auflage 2008 [18]. Die verwendeten Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen. 3

1.2 Charakteristika der Typ I - Nervenendigungen nach Freeman und Wyke (1967), zu denen das RK gehört [35]. Als Grundlage dient das Kniegelenk der Katze. 13

2.1 Die vorprogrammierten Schritte des Gewebeinfiltrationsautomaten. VAC = der Schritt findet unter Vakuum statt. 25

2.2 Übersicht über die Schritte der Entparaffinierung 26

2.3 Schritte der ElHvG-Färbung 27

3.1 Verteilung der RK und VPK in den 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des IP, eingeordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 35

3.2 Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf Höhe des IP in Summe und (arithmetischer Mittelwert). . . 36

3.3 Verteilung der RK und VPK in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe der PP, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 38

3.4 Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe der PP in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 38

3.5 Verteilung der RK, VPK und MSP in den 12 Übersichtspräparaten auf Höhe des MCPP, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 40

3.6 Verteilung der RK, VPK und MSP in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe des MC, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 42

3.7 Verteilung der RK in der Umgebung der FPL-Sehne in den 15 Übersichtspräparaten auf mittlerer Höhe des MC in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 43

3.8 Verteilung der RK, VPK und MSP in den 12 Übersichtspräparaten auf Höhe des CMC, geordnet nach Quadrant und Körperseite, in Summe und (arithmetischer Mittelwert). 45

Literaturverzeichnis

[1] (2014). URL https://www.dgaum.de/themen/leitlinien/

[2] Akiyama K, Takakura Y, Tomita Y, Sugimoto K, Tanaka Y and Tamai S: "Neurohistology of the sinus tarsi and sinus tarsi syndrome". *Journal of Orthopaedic Science* 4(4):299–303 (1999). URL http://dx.doi.org/10.1007/s007760050107

[3] Amadio PC, Hunter JM, Jaeger SH, Wehbe MA and Schneider LH: "The effect of vincular injury on the results of flexor tendon surgery in zone 2". *The Journal of Hand Surgery* 10(5):626–632 (1985). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(85)80197-0

[4] Armenta E and Fisher J: "Anatomy of flexor pollicis longus vinculum system". *The Journal of Hand Surgery* 9(2):210–212 (1984). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(84)80143-4

[5] Armenta E and Lehrman A: "The vincula to the flexor tendons of the hand". *The Journal of Hand Surgery* 5(2):127–134 (1980). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(80)80143-2

[6] Asaki S, Sekikawa M and Kim Y: "Sensory Innervation of Temporomandibular Joint Disk". *Journal of Orthopaedic Surgery* 14(1):3–8 (2006). URL http://dx.doi.org/10.1177/230949900601400102

[7] Azar CA, Culver JE and Fleegler EJ: "Blood supply of the flexor pollicis longus tendon". *The Journal of Hand Surgery* 8(4):471–475 (1983). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(83)80210-x

[8] Bade H, Krolak C and Koebke J: "Fibrous architecture of the dorsal aponeurosis of the thumb". *The Anatomical Record* 243(4):524–530 (1995). URL http://dx.doi.org/10.1002/ar.1092430416

[9] Barrack RL, Skinner HB and Buckley SL: "Proprioception in the anterior cruciate deficient knee". *The American Journal of Sports Medicine* 17(1):1–6 (1989). URL http://dx.doi.org/10.1177/036354658901700101

[10] BASTIAN HC: "THE "MUSCULAR SENSE"; ITS NATURE AND CORTICAL LOCALISATION". *Brain* 10(1):1–89 (1887). URL http://dx.doi.org/10.1093/brain/10.1.1

[11] Beard D, Kyberd P, Fergusson C and Dodd C: "Proprioception after rupture of the anterior cruciate ligament. An objective indication of the need for surgery?" *The*

Journal of Bone and Joint Surgery British volume 75-B(2):311–315 (1993). URL http://dx.doi.org/10.1302/0301-620X.75B2.8444956

[12] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Herz-Kreislauf-System, Lymphatisches System, Endokrines System, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut - Bd. 2*. Elsevier, Urban Fischer, 16. edition (2004)

[13] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Herz-Kreislauf-System, Lymphatisches System, Endokrines System, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut - Bd. 2*. Elsevier, Urban Fischer, 16. edition (2004)

[14] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[15] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[16] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[17] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[18] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[19] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[20] Benninghoff Alfred und Drenckhahn D: *Anatomie - Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. Elsevier, Urban Fischer, 17. edition (2008)

[21] Boyd IA: "The histological structure of the receptors in the knee-joint of the cat correlated with their physiological response". *The Journal of Physiology* 124(3):476–488 (1954). URL http://dx.doi.org/10.1113/jphysiol.1954.sp005122

[22] Brown C and McGrouther D: "The excursion of the tendon of flexor pollicis longus and its relation to dynamic splintage". *The Journal of Hand Surgery* 9(6):787–791 (1984). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(84)80049-0

[23] Çabuk H and Kuşku Çabuk F: "Mechanoreceptors of the ligaments and tendons around the knee". *Clinical Anatomy* 29(6):789–795 (2016). URL http://dx.doi.org/10.1002/ca.22743

[24] Çabuk H, Kuşku Çabuk F, Tekin AÇ, Dedeoğlu SS, Çakar M and Büyükkurt CD: "Lower numbers of mechanoreceptors in the posterior cruciate ligament and anterior capsule of the osteoarthritic knees". *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 25(10):3146–3154 (2016). URL http://dx.doi.org/10.1007/s00167-016-4221-z

[25] Cavalcante MLC, Rodrigues CJ and Mattar R: "Mechanoreceptors and nerve endings of the triangular fibrocartilage in the human wrist". *The Journal of Hand Surgery* 29(3):432–435 (2004). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2004.01.001

[26] CLARK FJ, BURGESS RC and CHAPIN JW: "PROPRIOCEPTION WITH THE PROXIMAL INTERPHALANGEAL JOINT OF THE INDEX FINGER". *Brain* 109(6):1195–1208 (1986). URL http://dx.doi.org/10.1093/brain/109.6.1195

[27] Clark NC, Röijezon U and Treleaven J: "Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 2: Clinical assessment and intervention". *Manual Therapy* 20(3):378–387 (2015). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.math.2015.01.009

[28] Cobo JL, Abbate F, de Vicente JC, Cobo J and Vega JA: "Searching for proprioceptors in human facial muscles". *Neuroscience Letters* 640:1–5 (2017). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2017.01.016

[29] de Carlos F, Cobo J, Macías E, Feito J, Cobo T, Calavia M, García-Suárez O and Vega J: "The Sensory Innervation of the Human Pharynx: Searching for Mechanoreceptors". *The Anatomical Record* 296(11):1735–1746 (2013). URL http://dx.doi.org/10.1002/ar.22792

[30] Del Valle M, Harwin S, Maestro A, Murcia A and Vega J: "Immunohistochemical analysis of mechanoreceptors in the human posterior cruciate ligament". *The Journal of Arthroplasty* 13(8):916–922 (1998). URL http://dx.doi.org/10.1016/s0883-5403(98)90199-1

[31] Doyle JR and Blythe WF: "Anatomy of the flexor tendon sheath and pulleys of the thumb". *The Journal of Hand Surgery* 2(2):149 – 151 (1977). URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0363502377801019

[32] Earley M: "The arterial supply of the thumb, first web and index finger and its surgical application". *The Journal of Hand Surgery: British European Volume* 11(2):163 – 174 (1986). URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266768186902536

[33] Esplin VS, Tencer AF, Hanel DP and Cosio MQ: "Restoration of function of the thumb flexor apparatus requires repair of the oblique and one adjacent flexor tendon pulley". *Journal of Orthopaedic Research* 14(1):152–156 (1996). URL http://dx.doi.org/10.1002/jor.1100140124

[34] Favia G, Corsalini M, Di Venere D, Pettini F, Favia G, Capodiferro S and Maiorano E: "Immunohistochemical Evaluation of Neuroreceptors in Healthy and Pathological Temporo-Mandibular Joint". *International Journal of Medical Sciences* 10(12):1698–1701 (2013). URL http://dx.doi.org/10.7150/ijms.6315

[35] Freeman M and Wyke B: "The innervation of the knee joint. An anatomical and histological study in the cat". *Journal of anatomy* (1967)

[36] Gohlke F, Janßen E, Leidel J, Heppelmann B and Eulert J: "Histomorphologische Befunde zur Propriozeption am Schultergelenk". *Der Orthopäde* 27(8):510 (1998). URL http://dx.doi.org/10.1007/s001320050263

[37] Grigg P and Hoffman AH: "Ruffini Mechanoreceptors in Isolated Joint Capsule: Responses Correlated with Strain Energy Density". *Somatosensory Research* 2(2):149–162 (1984). URL http://dx.doi.org/10.1080/07367244.1984.11800555

[38] Hagert E, Forsgren S and Ljung BO: "Differences in the presence of mechanoreceptors and nerve structures between wrist ligaments may imply differential roles in wrist stabilization". *Journal of Orthopaedic Research* 23(4):757–763 (2005). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.orthres.2005.01.011

[39] Hagert E, Lee J and Ladd AL: "Innervation Patterns of Thumb Trapeziometacarpal Joint Ligaments". *The Journal of Hand Surgery* 37(4):706–714.e1 (2012). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2011.12.038

[40] Hagert E, Persson JK, Werner M and Ljung BO: "Evidence of Wrist Proprioceptive Reflexes Elicited After Stimulation of the Scapholunate Interosseous Ligament". *The Journal of Hand Surgery* 34(4):642–651 (2009). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.12.001

[41] Halata Z: "The ultrastructure of the sensory nerve endings in the articular capsule of the knee joint of the domestic cat (Ruffini corpuscles and Pacinian corpuscles)." *Journal of Anatomy* 124 (Pt 3):717–729 (1977)

[42] Halata Z and Munger B: "Identification of the Ruffini corpuscle in human hairy skin". *Cell and Tissue Research* 219(2) (1981). URL http://dx.doi.org/10.1007/bf00210162

[43] Halata Z and Munger BL: "The ultrastructure of Ruffini and Herbst corpuscles in the articular capsule of domestic pigeon". *The Anatomical Record* 198 Issue 4:681–692 (1980)

[44] Halata Z and Munger BL: "The neuroanatomical basis for the protopathic sensibility of the human glans penis". *Brain Research* 371(2):205–230 (1986). URL http://dx.doi.org/10.1016/0006-8993(86)90357-4

[45] Halata Z, Rettig T and Schulze W: "The ultrastructure of sensory nerve endings in the human knee joint capsule". *Anatomy and Embryology* 172(3):265–275 (1985). URL http://dx.doi.org/10.1007/bf00318974

[46] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J and Liu Y: "Assessing proprioception: A critical review of methods". *Journal of Sport and Health Science* 5(1):80–90 (2016). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004

[47] Han J, Waddington G, Anson J and Adams R: "Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability". *Journal of Science and Medicine in Sport* 18(1):77–81 (2015). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2013.11.013

[48] HERGENROEDER PT, GELBERMAN RH and AKESON WH: "The Vascularity of the Flexor Pollicis Longus Tendon". *Clinical Orthopaedics and Related Research* NA;(162):298???303 (1982). URL http://dx.doi.org/10.1097/00003086-198201000-00046

[49] Hupperets MDW, Verhagen EALM, Heymans MW, Bosmans JE, van Tulder MW and van Mechelen W: "Potential Savings of a Program to Prevent Ankle Sprain Recurrence". *The American Journal of Sports Medicine* 38(11):2194–2200 (2010). URL http://dx.doi.org/10.1177/0363546510373470

[50] Johansson HE, Sjölander P and Sojka P: "A sensory role for the cruciate ligaments." *Clinical orthopaedics and related research* 268:161–78 (1991)

[51] Johnson LL, Bays BM and Eda van Dyk G: "Vincula of the biceps tendon in the glenohumeral joint: An arthroscopic and anatomic study". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 1(3):162–166 (1992). URL http://dx.doi.org/10.1016/1058-2746(92)90095-K

[52] JOSEPH J: "The sesamoid bones of the hand and the time of fusion of the epiphyses of the thumb". *Journal of anatomy* 85(3):230—241 (1951). URL https://europepmc.org/articles/PMC1273515

[53] Kassatkin S: "Die Sesambeine der Hand und des Fußes des Menschen". *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte* 102(5):635–654 (1934). URL http://dx.doi.org/10.1007/BF02137785

[54] Kholinne E, Lee HJ, Deslivia MF, Ga Yeong K, Lee SJ, Lim S and Jeon IH: "Neuroanatomical distribution of sensory receptors in the human elbow joint capsule". *Shoulder Elbow* 11(4):300–304 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1177/1758573218760245

[55] Kim YT and Azuma H: "The Nerve Endings of the Acetabular Labrum". *Clinical Orthopaedics and Related Research* 320:176–181 (November 1995)

[56] Kiter E, Karaboyun T, Tufan AC and Acar K: "Immunohistochemical Demonstration of Nerve Endings in Iliolumbar Ligament". *Spine* 35(4):E101–E104 (2010). URL http://dx.doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181ae561d

[57] Lee J, Ladd A and Hagert E: "Immunofluorescent Triple-Staining Technique to Identify Sensory Nerve Endings in Human Thumb Ligaments". *Cells Tissues Organs* 195(5):456–464 (2012). URL http://dx.doi.org/10.1159/000327725

[58] Leffert RD, Weiss C and Athanasoulis CA: "The vincula; with particular reference to their vessels and nerves." *The Journal of bone and joint surgery American volume* 56 6:1191–8 (1974)

[59] Lippert H: *Lehrbuch Anatomie*. Elsevier, Urban Fischer (2006)

[60] Lippert H: *Lehrbuch Anatomie*. Elsevier, Urban Fischer (2006)

[61] Lippert H: *Lehrbuch Anatomie*. Elsevier, Urban Fischer (2006)

[62] Lüllmann-Rauch R: *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag, 3. edition (2009)

[63] Lüllmann-Rauch R: *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag, 3. edition (2009)

[64] Lüllmann-Rauch R: *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag, 3. edition (2009)

[65] Lüllmann-Rauch R: *Taschenlehrbuch Histologie*. Georg Thieme Verlag, 3. edition (2009)

[66] Lundborg G: "The Vascularization of the Human Flexor Pollicis Longus Tendon". *Hand* os-11(1):28–33 (1979). URL `http://dx.doi.org/10.1016/s0072-968x(79)80005-4`

[67] McCloskey DI: "Kinesthetic sensibility." *Physiological Reviews* 58(4):763–820 (1978). URL `http://dx.doi.org/10.1152/physrev.1978.58.4.763`

[68] Moraes MR, Cavalcante ML, Leite JA, Macedo JN, Sampaio ML, Jamacaru VF and Santana MG: "The characteristics of the mechanoreceptors of the hip with arthrosis". *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 6(1):58 (2011). URL `http://dx.doi.org/10.1186/1749-799X-6-58`

[69] Moraes MRB, Cavalcante MLC, Leite JAD, Ferreira FV, Castro AJO and Santana MG: "Histomorphometric Evaluation of Mechanoreceptors and Free Nerve Endings in Human Lateral Ankle Ligaments". *Foot Ankle International* 29(1):87–90 (2008). URL `http://dx.doi.org/10.3113/FAI.2008.0087`

[70] Morisawa Y: "Morphological study of mechanoreceptors on the coracoacromial ligament*". *Journal of Orthopaedic Science* 3(2):102–110 (1998). URL `http://dx.doi.org/10.1007/s007760050029`

[71] Morley J, Fan C, McDermott K, Fede C, Hughes E and Stecco C: "The crural interosseous membrane re-visited: a histological and microscopic study". *European Journal of Translational Myology* 29(3) (2019). URL `http://dx.doi.org/10.4081/ejtm.2019.8340`

[72] Ochiai N, Matsui T, Miyaji N, Merklin RJ and Hunter JM: "Vascular anatomy of flexor tendons. I. Vincular system and blood supply of the profundus tendon in the digital sheath". *The Journal of Hand Surgery* 4(4):321–330 (1979). URL `http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(79)80068-4`

[73] Parks BJ, Arbelaez J and Horner RL: "Medical and surgical importance of the arterial blood supply of the thumb". *The Journal of Hand Surgery* 3(4):383–385 (1978). URL `http://dx.doi.org/10.1016/S0363-5023(78)80044-6`

[74] Petrie S, Collins J, Solomonow M, Wink C and Chuinard R: "MECHANORECEPTORS IN THE PALMAR WRIST LIGAMENTS". *The Journal of Bone and Joint Surgery British volume* 79-B(3):494–496 (1997). URL http://dx.doi.org/10.1302/0301-620X.79B3.0790494

[75] Rein S, Hanisch U, Zwipp H, Fieguth A, Lwowski S and Hagert E: "Comparative Analysis of Inter- and Intraligamentous Distribution of Sensory Nerve Endings in Ankle Ligaments". *Foot Ankle International* 34(7):1017–1024 (2013). URL http://dx.doi.org/10.1177/1071100713480862

[76] Rein S, Manthey S, Zwipp H and Witt A: "Distribution of sensory nerve endings around the human sinus tarsi: a cadaver study". *Journal of Anatomy* 224(4):499–508 (2014). URL http://dx.doi.org/10.1111/joa.12157

[77] Rein S, Semisch M, Garcia-Elias M, Lluch A, Zwipp H and Hagert E: "Immunohistochemical Mapping of Sensory Nerve Endings in the Human Triangular Fibrocartilage Complex". *Clinical Orthopaedics and Related Research®* 473(10):3245–3253 (2015). URL http://dx.doi.org/10.1007/s11999-015-4357-z

[78] Roberts S, Eisenstein SM, Menage J, Evans EH and Ashton IK: "Mechanoreceptors in Intervertebral Discs". *Spine* 20(24):2645–2651 (1995). URL http://dx.doi.org/10.1097/00007632-199512150-00005

[79] Röijezon U, Clark NC and Treleaven J: "Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 1: Basic science and principles of assessment and clinical interventions". *Manual Therapy* 20(3):368–377 (2015). URL http://dx.doi.org/10.1016/j.math.2015.01.008

[80] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[81] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[82] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[83] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[84] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[85] Schmidt HM and Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. edition (2003)

[86] Sherrington CS: *The Integrative Action of the Nervous System*. Yale University Press, New Haven (1906)

[87] Smith RL and Brunolli J: "Shoulder Kinesthesia After Anterior Glenohumeral Joint Dislocation". *Physical Therapy* 69(2):106–112 (1989). URL http://dx.doi.org/10.1093/ptj/69.2.106

[88] Speckmann EJ and Hescheler J: *Physiologie - Das Lehrbuch*. Elsevier, Urban Fischer, Hackerbrücke 6, 80335 München, 7. edition (2019)

[89] Standring S: *Gray's Anatomy - The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Churchill Livingstone/Elsevier, 40th edition (2008)

[90] Standring S: *Gray's Anatomy - The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Churchill Livingstone/Elsevier, 40th edition (2008)

[91] Standring S: *Gray's Anatomy - The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Churchill Livingstone/Elsevier, 40th edition (2008)

[92] Standring S: *Gray's Anatomy - The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Churchill Livingstone/Elsevier, 40th edition (2008)

[93] Stecco C, Corradin M, Macchi V, Morra A, Porzionato A, Biz C and De Caro R: "Plantar fascia anatomy and its relationship with Achilles tendon and paratenon". *Journal of Anatomy* 223(6):665–676 (2013). URL `http://dx.doi.org/10.1111/joa.12111`

[94] Stecco C, Porzionato A, Macchi V, Tiengo C, Parenti AR, Aldegheri R, Delmas V and Caro RD: "Histological characteristics of the deep fascia of the upper limb." *Italian journal of anatomy and embryology = Archivio italiano di anatomia ed embriologia* 111 2:105–10 (2006)

[95] Steinbeck J, Brüntrup J, Greshake O, Pötzl W, Filler T and Liljenqvist U: "Neurohistological examination of the inferior glenohumeral ligament of the shoulder". *Journal of Orthopaedic Research* 21(2):250–255 (2003). URL `http://dx.doi.org/10.1016/S0736-0266(02)00155-9`

[96] Taylor J: "Proprioception". *Encyclopedia of Neuroscience* pages 1143–1149 (2009). URL `http://dx.doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01907-0`

[97] Taylor JL and McCloskey DI: "Ability to detect angular displacements of the fingers made at an imperceptibly slow speed." *Brain : a journal of neurology* 113 (Pt 1):157–66 (1990)

[98] Vallbo AB, Hagbarth KE, Torebjork HE and Wallin BG: "Somatosensory, proprioceptive, and sympathetic activity in human peripheral nerves". *Physiological Reviews* 59(4):919–957 (1979). URL `http://dx.doi.org/10.1152/physrev.1979.59.4.919`

[99] Vangsness C, Ennis M, Taylor JG and Atkinson R: "Neural anatomy of the glenohumeral ligaments, labrum, and subacromial bursa". *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic Related Surgery* 11(2):180–184 (1995). URL `http://dx.doi.org/10.1016/0749-8063(95)90064-0`

[100] Waldeyer A: *Waldeyer - Anatomie des Menschen - Lehrbuch und Atlas in einem Band ; [44 Tabellen]*. De Gruyter, Berlin, 19. edition (2012)

[101] Waldeyer A: *Waldeyer - Anatomie des Menschen - Lehrbuch und Atlas in einem Band ; [44 Tabellen]*. De Gruyter, Berlin, 19. edition (2012)

[102] Waschke J, Böckers TM and Paulsen F: *Sobotta Anatomie - Das Lehrbuch*. Elsevier, Urban Fischer, Hackerbrücke 6, 80335 München, 2. edition (2019)

[103] Waschke J, Böckers TM and Paulsen F: *Sobotta Anatomie - Das Lehrbuch*. Elsevier, Urban Fischer, Hackerbrücke 6, 80335 München, 2. edition (2019)

[104] Yang L, Chen J, Yang C, Pang X, Li D, Wu B, Wu Y, Lu X, Xu J, Chen X and et al: "Cervical Intervertebral Disc Degeneration Contributes to Dizziness: A Clinical and Immunohistochemical Study". *World Neurosurgery* 119:e686–e693 (2018). URL `http://dx.doi.org/10.1016/j.wneu.2018.07.243`

[105] Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B and Cholewicki J: "The Effects of Core Proprioception on Knee Injury". *The American Journal of Sports Medicine* 35(3):368–373 (2007). URL `http://dx.doi.org/10.1177/0363546506297909`

[106] Zbrodowski A, Gajisin S and Grodecki J: "Mesotendons of digital flexor muscles and their vasculature". *The Hand* 13(3):231 – 238 (1981). URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0072968X81800022`

[107] Zissimos AG, Szabo RM, Yinger KE and Sharkey NA: "Biomechanics of the thumb flexor pulley system". *The Journal of Hand Surgery* 19(3):475–479 (1994). URL `http://dx.doi.org/10.1016/0363-5023(94)90066-3`