

Diplomarbeit

**Verknöcherungen des Ligamentum pterygoalare und
Ligamentum pterygospinale**

-

**Häufigkeit, Ausprägungsgrad und Relevanz dieser
anatomischen Variationen**

eingereicht von

Lena Christin Götz

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde
(Drⁱⁿ. med. univ.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Gottfried Schatz Forschungszentrum

Lehrstuhl für makroskopische und klinische Anatomie

unter der Anleitung von

Univ. FÄ Priv.Doiz. DDr. Bettina Pretterklieber, Bakk. rer. nat.
Ao. Univ.-Prof. Dr. Michael Pretterklieber

Graz, 04.03.2025

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Graz, 04.03.2025

Lena Christin Götz eh.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während meiner Diplomarbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, PD Dr. Bettina Pretterklieber und Prof. Dr. Michael Pretterklieber, für ihre wertvolle Unterstützung, ihr konstruktives Feedback und ihre Geduld. Ihre Expertise und Anregungen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich meiner Mutter Carolin, die mich stets ermutigt und unterstützt hat – nicht nur während dieser Arbeit, sondern auf meinem gesamten Bildungsweg.

Mein herzlicher Dank gilt auch meinen engsten Freunden, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Besonders hervorheben möchte ich Julia, die mir immer wieder Motivation und Zuspruch gegeben und mich immer unterstützt hat, sowie Marco, mit dem ich viele intensive Stunden beim Arbeiten an unseren Diplomarbeiten verbracht habe.

Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen – danke!

Zusammenfassung

Hintergrund:

Im Bereich der Fossa infratemporalis des Menschen, nahe des Foramen ovale, können zwei unterschiedliche akzessorische Bandstrukturen vorkommen, das Lig. pterygoalare sowie das Lig. pterygospinale. Beide Bänder können teilweise oder vollständig verknöchert vorliegen.

Die Existenz dieser Strukturen kann zu einer möglichen Kompression des N. mandibularis oder seiner Äste führen und somit als mögliche Ursache einer Trigeminusneuralgie in Betracht gezogen werden. Außerdem können die Knochenbrücken bei invasiven Eingriffen im Bereich des Foramen ovale, wie etwa der Behandlung von Trigeminusneuralgien, zu anatomischen Hindernissen führen.

Ziele:

Ziel dieser Studie war die Bestimmung der Prävalenzen der Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale. Dabei wurden Seiten-, Geschlechts- und Altersunterschiede (kindlich / juvenil vers. adult) erfasst. Zusätzlich wurde die Darstellbarkeit der Verknöcherungen an CT-Bildern geprüft.

Methodik:

564 mazerierte Schädel (1128 Seiten) wurden auf das Vorkommen von beginnenden, fortgeschrittenen und kompletten Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale untersucht. Die bildgebende Darstellbarkeit dieser Verknöcherungen wurde mittels CT-Datensätze dieser Schädel überprüft.

Resultate:

Insgesamt konnte bei 308 (54,6%) von den 564 untersuchten Schädeln auf mindestens einer Seite ein verknöchertes Lig. pterygoalare und / oder Lig. pterygospinale beobachtet werden. 26,8% wiesen mindestens ein verknöchertes Lig. pterygoalare auf, 42,4% mindestens ein verknöchertes Lig. pterygospinale. Unter allen untersuchten Seiten (n=1128) konnte ein vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare in 1,24% der Fälle beobachtet werden, ein vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale in 2,22%. Unvollständige Verknöcherung zeigte sich bei beiden Bändern häufiger als vollständige Verknöcherung. Im Seitenvergleich zeigten sich bei beiden Bändern nur geringgradige Unterschiede, das Lig. pterygospinale konnte allerdings öfter beidseits verknöchert beobachtet werden. Adulte Schädel hatten

insgesamt geringfügig höhere Verknöcherungsraten als kindliche und juvenile Schädel. Unvollständige Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale konnten etwas häufiger an männlichen als an weiblichen Schädeln beobachtet werden. Die Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale konnten an den koronaren, sagittalen sowie axialen CT-Schnitten sowie den multiplanaren Rekonstruktionen vollständig diagnostiziert werden.

Conclusio:

Die hohe Prävalenz der Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale hebt die Bedeutung des Wissens über deren Existenz, Lage sowie die klinische Relevanz hervor. Die gute Befundbarkeit dieser Verknöcherungen an CT-Datensätzen bestätigt, dass präinterventionell mittels CT-Bildgebung Verknöcherungen detektiert und somit Schwierigkeiten beim Zugang zum Foramen ovale vermieden werden könnten.

Abstract

Background:

In the infratemporal fossa close to the foramen ovale, two accessory ligaments can occur: the so-called pterygoalar and pterygospinous ligaments. These ligaments can be completely or partially ossified.

The existence of these structures could lead to entrapment of the mandibular nerve or one of its branches, which could be considered as a possible cause of trigeminal neuralgia. Additionally, during invasive procedures, such as treatment of trigeminal neuralgia, these structures may represent an anatomical obstacle.

Objectives:

The aim of this study was to determine the prevalence of partial and complete ossification of the pterygoalar and pterygospinous ligaments, while also analyzing side, sex, and age differences. Furthermore, the study aims to evaluate the detectability of these ossifications in CT images.

Methods:

564 macerated skulls (1128 sides) were examined for ossification of these ligaments. The detectability of ossification in CT scans was assessed.

Results:

Among the 564 examined skulls, at least one ossified pterygoalar and/or pterygospinous ligament was observed on at least one side in 308 cases (54.6%). A pterygoalar ligament was ossified in 26.8%, while a pterygospinous ligament was ossified in 42.4% of cases. Among all examined sides ($n = 1128$), a completely ossified pterygoalar ligament was observed in 1.24% of cases, while a completely ossified pterygospinous ligament was found in 2.22%. Partial ossification was more frequent than complete ossification for both ligaments. Side comparisons revealed only minor differences in both ligaments, although the pterygospinous ligament was more often bilaterally ossified. Adult skulls exhibited slightly higher ossification rates compared to juvenile and child skulls. Incomplete ossifications of the pterygoalar and pterygospinous ligaments were observed slightly more frequently in male skulls than in female skulls. The ossifications of the pterygoalar and pterygospinous

ligaments could be fully traced in coronal, sagittal, and axial CT-slices as well as in multiplanar reconstructions.

Conclusion:

The high prevalence of ossifications in the pterygoalar et pterygospinous ligaments highlights the importance of awareness of their existence, location, and relevance in clinical practice. The good detectability of these ossifications in CT scans confirms that pre-interventional CT imaging may help identify ossifications and prevent complications when accessing the foramen ovale.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagungen	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungen und deren Erklärungen	1
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
1. Einleitung	4
1.1 Anatomie und Topografie der tiefen seitlichen Gesichtsregion	6
1.1.1 Knochen.....	6
1.1.2 Muskeln	7
1.1.3 Nerven	7
1.1.4 Arterien.....	9
1.2 Klinischer Bezug	10
1.3 Fragestellung und Hypothese der Studie	14
2 Material und Methoden	15
2.1 Präparate	15
2.2 Methode	16
3 Ergebnisse.....	22
3.1 Lig. pterygoalare.....	22
3.2 Lig. pterygospinale	24
3.3 Darstellbarkeit der Verknöcherungen in CT-Datensätzen.....	27
3.3.1 Lig. pterygoalare.....	27

3.3.2	Lig. pterygospinale	30
4	Diskussion.....	33
4.1	Antworten auf die Forschungsfragen und Vergleich mit bereits publizierten Studien	33
4.1.1	Vergleich der Prävalenzen.....	33
4.1.2	Seitenvergleich	35
4.1.3	Geschlechtervergleich	36
4.1.4	Altersvergleich.....	36
4.1.5	CT	38
4.2	Kritische Reflexion und Einschränkungen	38
4.3	Ausblick und Anregungen für weiterführende Arbeiten	39
4.4	Schlussfolgerungen.....	40
	Literaturverzeichnis	41

Abkürzungen und deren Erklärungen

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
AM	Ala major
FO	Foramen ovale
FS	Foramen spinosum
latFO	lateraler Rand des Foramen ovale
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
LL	Lamina lateralis
M.	Musculus
Mm.	Musculi
N.	Nervus
Nn.	Nervi
PA I – III	Verknöcherung des Lig. pterygoalare, Grad I – III
PC	Porus crotaphiticobuccinatorius
Proc.	Processus
PS I – III	Verknöcherung des Lig. pterygospinale, Grad I – III
R.	Ramus
Rr.	Rami
S	Spina ossis sphenoidalis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geschlechterverteilung in der untersuchten Gesamtpopulation.....	16
Abbildung 2: Beginnende Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA I).....	17
Abbildung 3: Unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA II).....	17
Abbildung 4: Vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA III).....	18
Abbildung 5: Beginnende Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS I).....	19
Abbildung 6: Unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS II).....	20
Abbildung 7: Vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS III).....	20
Abbildung 8: Achse in Längsrichtung des Foramen ovale für die multiplanare Rekonstruktion der CT-Datensätze	21
Abbildung 9: Seitenvergleich unter allen Schädeln mit Verknöcherung des Lig. pterygoalare	22
Abbildung 10: Seitenvergleich unter allen Schädeln mit Verknöcherung des Lig. pterygospinale.....	25
Abbildung 11: Vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare links (PA III).....	28
Abbildung 12: Multiplanare Rekonstruktion eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite.....	30
Abbildung 13: Vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale rechts (PS III).....	31
Abbildung 14: Multiplanare Rekonstruktion eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale(PS III) auf der rechten Seite	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geschlechter- und Altersvergleich bezogen auf die Lage des verknöcherten Lig. pterygoalare.	23
Tabelle 2: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygoalare (PA I – III).	23
Tabelle 3: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygoalare im Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich.	24
Tabelle 4: Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich der Verknöcherungen des Lig. pterygospinale.....	26
Tabelle 5: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygospinale (PS I – III)	26
Tabelle 6: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygospinale im Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich	27

1. Einleitung

Im Bereich der Fossa infratemporalis des Menschen, nahe des Foramen ovale, können zwei unterschiedliche akzessorische Bandstrukturen vorkommen. Dabei handelt es sich um das Lig. pterygoalare sowie das Lig. pterygospinale.

Das Lig. pterygoalare verläuft von der Wurzel der Lamina lateralis processus pterygoidei zur kaudalen Fläche der Ala major ossis sphenoidalis (1). Dieses Lig. pterygoalare (engl. *pterygoalar ligament*) oder nach seinem Erstbeschreiber *Hyrtl's ligament* kann verknöchert als *pterygoalar bar* vorliegen (2). Von manchen Autoren wird die Bandstruktur auch als *Calori's ligament* betitelt (3, 4). Bei vollständiger Verknöcherung entsteht inferolateral des Foramen ovale ein knöcherner Durchtritt, der von Hyrtl 1862 als *Foramen crotaphiticobuccinatorius* bezeichnet wurde und inferolateral des Foramen ovale liegend beschrieben wird (2). Bei einer breiteren Ausprägung dieser Knochenspange beschreibt Hyrtl einen entstandenen Kanal, den *Porus crotaphiticobuccinatorius* (2). Der durch Verknöcherung entstandene Kanal kann eine Durchtrittsstelle für Äste des N. mandibularis bilden. Hyrtl beschreibt einen Teil des N. mandibularis, den sog. N. crotaphiticobuccinatorius (der „Schläfenwangennerv“), als Inhalt des Kanals (2). Die einzelnen Nervenäste, die die Öffnung passieren können, sind die Nn. temporales profundi und der N. massetericus, seltener auch der N. buccalis sowie der N. pterygoideus lateralis (2, 5, 6). Grosse beschreibt eine vom lateralen Rand des Foramen ovale nach lateral ziehende Furche, die er als Sulcus crotaphiticus bezeichnet und die den N. crotaphiticobuccinatorius beinhaltet. Diese Furche sei der Boden des Kanals, den Hyrtl als Porus crotaphiticobuccinatorius betitelt (7). Das überbrückende Band, das verknöchert zur Entstehung des Porus crotaphiticobuccinatorius führt, betitelt Grosse in seiner Arbeit *Lig. pterygosphenoideum* (7).

Das Lig. pterygospinale verläuft vom posterioren Rand der Lamina lateralis processus pterygoidei ossis sphenoidalis zur Spina ossis sphenoidalis. Diese ligamentäre Struktur kann ebenfalls vollständig oder teilweise verknöchert vorliegen (8-10). Das Band wird nach seinem Erstbeschreiber Civinini (9) als *Civinini's ligament* bzw. in der Terminologia anatomica 2023 als *Lig. pterygospinale* betitelt (11). Bei Verknöcherung wird von einem *Civininian bar* oder *pterygospinous bar* gesprochen (12). Vollständig verknöchert bildet die Knochenbrücke das *Foramen pterygospinale* (engl. *pterygospinous foramen*), welches auch

als *Civinini's foramen* bezeichnet wird und welches ebenfalls Ästen des N. mandibularis Durchtritt ermöglichen kann (2, 5).

Die Lage der Knochenbrücke wird als inferior oder inferomedial des Foramen ovale beschrieben (2). Grosse beschreibt den Ursprung am Processus pterygoideus genauer. Die Lamina lateralis processus pterygoideus weist an ihrem posterioren Rand mittig eine Spitze auf, die als Spina Civinini bezeichnet wird (7). In der Terminologia Anatomica wird diese Vorsprung als Processus pterygospinosus bezeichnet (11). Kranial davon zeigt die Lamina lateralis einen von Grosse als Incisura Civinini benannten halbkreisförmigen geglätteten Einschnitt von wechselnder Größe, der nach kranial in die mediale Begrenzung des Foramen ovale übergeht. Gelegentlich wird innerhalb dieses Einschnitts ein weiterer Vorsprung beobachtet, der als Spina Civinini spuria bezeichnet wird. Von der Spina Civinini, die zugleich das kraniale Ende der Lamina lateralis processus pterygoideus darstellt, kann das Lig. pterygospinale bzw. dessen Verknöcherung in Richtung der Spina ossis sphenoidalis verlaufen. Bei Vorkommen einer knöchernen Verbindung zur Spina Civinini spuria kann das Foramen Civinini zwei bis dreigeteilt vorkommen (7). Durch dieses Foramen können der N. pterygoideus medialis, der R. musculus tensoris veli palatini sowie der R. musculus tensoris tympani durchtreten (13-15). Die Hauptportion des N. mandibularis liegt gewöhnlich lateral des Bandes (15). Gelegentlich kann die bandhafte Struktur durch Muskelfasern ersetzt sein und den sogenannten M. pterygospinosus bilden (8, 16).

Bereits Hyrtl (2) beschrieb 1862, dass es sich bei den beiden Bändern bzw. deren Verknöcherungen um zwei unterschiedliche Strukturen handeln muss, da er ein gleichzeitiges Vorkommen beider Verknöcherungen nebeneinander beobachten konnte.

In einigen Studien werden die Ligg. pterygoalare et pterygospinale als kraniale Verdickung der Faszie zwischen den Mm. pterygoidei medialis et lateralis diskutiert (3, 13, 15, 17). Andere Autoren sehen im Lig. pterygospinale eine Abspaltung des M. pterygoideus lateralis (15, 16, 18).

Aufgrund des Vorkommens des verknöcherten Lig. pterygospinale bei Herbivoren, Carnivoren und Altweltaffen im Gegensatz zum Fehlen an den Schädeln von Neuweltaffen, wird die Struktur als phylogenetisches Überbleibsel gewertet (5, 19-22). Die Ossifikation wird als von genetischen Faktoren bedingt beschrieben, da unterschiedliche Prävalenzen bei Schädeln unterschiedlicher ethnischer Herkunft nachgewiesen werden konnten (1, 4, 5, 15). Es wird allerdings auch diskutiert, dass die akzessorischen Bänder auch sekundär im Laufe

des Lebens aufgrund im höheren Lebensalter vorkommender Ossifikation verknöchern können (23). Das Vorkommen der knöchernen Brücken an kindlichen Schädeln unterstützt die Theorie genetischer Faktoren, die zur Bildung der knöchernen Brücken geführt haben (3, 13, 15, 23, 24). Daher besteht die Ansicht, dass die Bänder sowohl kongenital als auch sekundär erworben verknöchert sein können (12, 24). In Bezug auf eine mögliche sekundäre Verknöcherung wird in Betracht gezogen, dass Belastungsfaktoren wie einseitiges Kauen verantwortlich für eine einseitige Verknöcherung im Laufe des Lebens sein können (21, 25).

1.1 Anatomie und Topografie der tiefen seitlichen Gesichtsregion

1.1.1 Knochen

Die Ligg. pterygoalare et pterygospinale liegen in der Fossa infratemporalis. Die Vorderwand der Fossa infratemporalis wird durch das Tuber maxillae, die mediale Wand durch die Lamina lateralis des Processus pterygoideus ossis sphenoidalis und die laterale Begrenzung durch den Ramus mandibulae gebildet. Als Dach fungiert die Ala major ossis sphenoidalis, die gleichzeitig zusammen mit der Facies anterior der Pars petrosa ossis temporalis den Boden der Fossa cranii media bildet. Nach kranial geht sie auf Höhe des Arcus zygomaticus an der Crista infratemporalis ossis sphenoidalis in die Fossa temporalis über (8, 26).

Eine wichtige Verbindung zur Fossa cranii media stellt das in der Ala major ossis sphenoidalis liegende Foramen ovale dar, durch welches der N. mandibularis, der dritte Ast des N. trigeminus (N. V), der N. petrosus minor, der aus dem N. glossopharyngeus (N. IX) stammt, sowie die A. pterygomeningea durchtreten (26).

Dorsolateral eng angeschlossen an das Foramen ovale befindet sich das Foramen spinosum, durch welches die A. meningea media sowie der R. meningeus nervi mandibularis durchtreten (26).

An der okzipitalen Spitze der Ala major befindet sich die Spina ossis sphenoidalis, welche die Befestigungsstelle sowohl für das Lig. pterygospinale, als auch für das Lig. sphenomandibulare bildet (8, 26).

Mit der Fossa pterygopalatina steht die Fossa infratemporalis über die Fissura pterygomaxillaris in Verbindung. Durch diese verläuft die A. maxillaris. Über den lateralen Anteil der Fissura orbitalis inferior besteht eine Verbindung zur Orbita, hier verläuft die A. infraorbitalis (26).

Die Fossa infratemporalis beinhaltet die Mm. pterygoidei medialis et lateralis, Äste des N. mandibularis, die Chorda tympani, das Ganglion oticum, die A. maxillaris mit den Ästen ihrer Pars mandibularis und Pars pterygoidea, der Plexus venosus pterygoideus, die Plexus venosi foraminis ovalis et foraminis spinosi sowie Anteile des Corpus adiposum buccae (26). Auf diese Strukturen wird im Folgenden genauer eingegangen (26).

1.1.2 Muskeln

Der M. pterygoideus medialis entspringt in der Fossa pterygoidea sowie an der Lamina lateralis des Proc. pterygoideus ossis sphenoidalis. Er inseriert an der Tuberositas pterygoidea mandibulae. Die Innervation erfolgt über den N. pterygoideus medialis, einen Ast des N. mandibularis. Die arterielle Versorgung übernehmen die Rr. pterygoidei der A. maxillaris (26).

Der M. pterygoideus lateralis ist ein zweiköpfiger Muskel. Sein Caput superius entspringt an der Crista infratemporalis, sein Caput inferius an der Lamina lateralis processus pterygoideus ossis sphenoidalis. Der Muskel inseriert in der Fovea pterygoidea mandibulae, am Collum mandibulae, sowie der Kapsel und am Discus articularis der Art. temporomandibularis. Die Innervation erfolgt über den N. pterygoideus lateralis, einen weiteren Ast des N. mandibularis. Arteriell versorgt wird der Muskel ebenfalls durch die Rr. pterygoidei der A. maxillaris (26). Der M. pterygoideus lateralis ist der einzige Kaumuskel, der funktionell eine Kieferöffnung bewirkt. Die restlichen Kaumuskeln, der M. pterygoideus medialis, der M. temporalis sowie der M. masseter dienen dem Kieferschluss (26, 27).

1.1.3 Nerven

Der N. trigeminus, der fünfte Hirnnerv, ist gemischt motorisch und sensibel. Seine Radix sensoria versorgt die gesamte Gesichtshaut, die Mund- sowie Nasenschleimhaut sowie den Großteil der Hirnhäute. Die Radix motoria versorgt die Kaumuskulatur (26, 28). Vor seinem Durchtritt durch die Schädelbasis bildet der N. trigeminus sein sensibles Ganglion trigeminale (Ganglion Gasseri), das im Cavum trigeminale liegt. Im Anschluss an das Ganglion teilt er sich in seine drei großen Äste auf: Den N. ophthalmicus (V.1), den N. maxillaris (V.2), sowie den N. mandibularis (V.3). Letzter beinhaltet die gesamte Radix motoria sowie einen Teil der Radix sensoria (26, 28). Die drei Äste verlassen durch separate Öffnungen die Schädelbasis. Der N. mandibularis verlässt die Schädelbasis als kräftigster

der drei Trigeminasäste durch das Foramen ovale und gelangt so in die Fossa infratemporalis. (26, 29). Unmittelbar nach dem Durchtritt durch das Foramen ovale teilt er sich in seine weiteren Äste auf (28).

Sensible Äste (28):

- R. meningeus
- N. auriculotemporalis
- N. alveolaris inferior
- N. lingualis
- N. buccalis

Muskeläste (28):

- N. massetericus
- Nn. temporales profundi
- Nn. pterygoidei medialis et lateralis
- N. mylohyoideus
- R. muscoli tensoris veli palatini
- R. muscoli tensoris tympani

Die aus dem N. intermedius stammende Chorda tympani betritt die Fossa infratemporalis über die Fissura petrotympanica. Sie besteht aus präganglionären parasymphatischen und sensorischen Fasern (26).

Das Ganglion oticum, eines der parasymphatischen Kopfganglien befindet sich in der Fossa infratemporalis medial des Austrittes des N. mandibularis. Es dient der Umschaltung der sekretomotorischen Fasern für die Glandula parotidea, welche der N. petrosus minor aus dem N. glossopharyngeus zum Ganglion bringt (26, 28).

1.1.4 Arterien

Die A. maxillaris betritt die Fossa infratemporalis durch den sogenannten Juvara Slot, einen Spalt zwischen dem Ramus mandibulae und dem Ligamentum sphenomandibulare (26). Sie lässt sich in drei Abschnitte gliedern: Die Partes mandibularis, pterygoidea et pterygopalatina, wobei der zweite Abschnitt in der Fossa infratemporalis liegt. Der erste Abschnitt liegt im oben beschriebenen Juvara Slot dorsal zum Ramus mandibulae, der dritte in der Fossa pterygopalatina. Die A. maxillaris kann medial oder lateral des M. pterygoideus lateralis verlaufen (26, 30). Folgende Äste entspringen aus der A. maxillaris (31):

Pars mandibularis:

- A. auricularis profunda
- A. tympanica anterior
- A. meningea media, welche gelegentlich die A. pterygomeningea abgibt
- A. alveolaris inferior
- A. temporalis profunda posterior
- A. masseterica

Pars pterygoidea:

- A. temporalis profunda anterior
- A. buccalis
- Rr. pterygoidei
- A. alveolaris superior posterior
- A. infraorbitalis

Pars pterygopalatina:

- A. palatina descendens
- A. canalis pterygoideus

-A. sphenopalatina

Die A. meningea media betritt die Schädelbasis durch das Foramen spinosum, die inkonstant auftretende A. pterygomeningea durch das Foramen ovale. Letztere entspringt entweder direkt aus der A. maxillaris oder aus der A. meningea media (8).

1.2 Klinischer Bezug

Die klinische Relevanz der beschriebenen Strukturen ergibt sich aus den engen topografischen Lagebeziehungen im Bereich der Fossa infratemporalis (3). Der N. mandibularis verzweigt sich unmittelbar nach seinem Austritt aus dem Foramen ovale in seine Äste. Der Stamm und vor allem seine Äste sind dabei in enger Lagebeziehung zu muskulären, vaskulären und den oben beschriebenen ligamentären bzw. ossären Strukturen (3, 26).

Die Existenz der Bänder und Knochenbrücken könnte daher zu einer mechanischen Kompression des N. mandibularis oder, je nach individueller Lage der Strukturen, einem seiner Äste führen (3, 13, 32, 33). Eine daraus resultierende periphere Nervenkompression sollte daher im klinischen Alltag als eine mögliche Ursache einer Trigemineuralgie in Betracht gezogen werden (1, 4, 5).

Klinisch präsentiert sich eine Trigemineuralgie als stechender, episodisch auftretender, typisch einseitiger starker Gesichtsschmerz im Innervationsgebiet des N. trigeminus bzw. eines seiner Äste, wobei die Schmerzsymptomatik im Innervationsgebiet des N. ophthalmicus deutlich seltener als im Innervationsgebiet des N. maxillaris und des N. mandibularis auftritt. Einfache Reize wie kalte oder warme Zugluft, Rasieren der Gesichtshaut, Kauen oder Zähne putzen können die akuten Schmerzattacken auslösen. Diese dauern in der Regel Sekunden bis einige Minuten an (34). Meist ist eine intrakranielle vaskuläre Kompression des N. trigeminus nahe des Hirnstammes bzw. des Ganglion trigeminale Ursache für die Entstehung dieser Neuralgie (34, 35). Der Druck, der durch den Gefäßkontakt auf den Nerven entsteht, kann dabei zu einer Demyelinisierung des Nerven führen, wodurch wiederum eine unphysiologische Depolarisationsbereitschaft und Impulsgenerierung resultieren kann. Dadurch können die episodisch auftretenden Nervenschmerzen entstehen. Etwa 80 % der Trigemineuralgien werden durch diesen Gefäßkontakt, meist mit Arterien, verursacht (16, 34). Andere organische Ursachen können

Multiple Sklerose, maligne und benigne intrakranielle Tumore oder Gefäßmalformationen sein (34, 36).

Knöcherne Engstellen im Bereich der Schädelbasis, wie z.B. durch Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinosum, müssen als seltene, aber mögliche Entstehungsursache vor allem bei unklarer Ätiologie in Betracht gezogen werden (1, 4, 15, 35). Die Symptomatik der Nervenkompression kann je nach Lage des verknöcherten Bandes vielfältig ausfallen, je nachdem welche der Äste des N. mandibularis betroffen sind. Die Kompression des N. lingualis kann zu beeinträchtigter Geschmackswahrnehmung sowie Hyp- bzw. Anästhesie des Corpus linguae, Sensibilitätsstörungen der lingualen Gingiva, Schmerzen sowie Dysfunktion der Speichelsekretion der Glandulae submandibularis et sublingualis führen (20, 28, 33, 37-39). Der N. lingualis deszendiert nach Abgang aus dem Stamm des N. mandibularis zwischen den Köpfen des M. pterygoideus lateralis (oberflächlich) und dem von der Fascia stylopharyngea bedeckten M. tensor veli palatini sowie dem M. pterygoideus medialis (profund) in Richtung seiner Zielregion (26, 38). Bei Vorkommen eines verknöcherten Lig. pterygospinale kann der Nerv zwischen diesem und dem M. pterygoideus medialis komprimiert werden, was zu oben beschriebenen Ausfallerscheinungen in seinem Innervationsgebiet und Schmerzen, vor allem beim Sprechen und Kauen, führen kann. (13, 15, 20, 38, 39).

Goyal et al. (23) weisen darauf hin, dass sich verknöcherte Ligg. pterygospinalia je nach Lage zum Foramen ovale klinisch unterschiedlich präsentieren können. Ist die knöcherne Brücke medial des Foramen ovale gelegen, ist eine geringe klinische Signifikanz zu erwarten. Bei Lage inferior zum Foramen ovale ist die Symptomatik durch Kompression verschiedener Äste des N. mandibularis vielfältig und nicht unwahrscheinlich (23).

Abhängig von seiner Lage zum Foramen ovale wird auch dem verknöcherten Lig. pterygoalare eine mögliche Kompression des N. lingualis, zugesprochen (40). Ein verknöchertes Lig. pterygoalare kann allerdings auch andere Äste des N. mandibularis komprimieren, wie die Nn. temporales profundi, massetericus, pterygoideus lateralis, buccalis et auriculotemporalis (13, 40). Die mechanische Kompression der Muskeläste des N. mandibularis kann zu Symptomen wie Kaustörungen mit Schwächung der Kaumuskulatur und Schmerzen beim Kauen oder Sprechen führen (40). Schmerzen und Dysästhesien im Innervationsgebiet des sensiblen N. auriculotemporalis sowie

Veränderungen in der Sekretion der Glandula parotidea können ebenfalls auftreten (13, 15, 40, 41).

Die Knochenbrücken können nicht nur Symptome einer Nervenkompression auslösen, sondern auch bei verschiedenen Eingriffen im Bereich der Fossa infratemporalis, insbesondere mit Zugang zur Schädelbasis durch das Foramen ovale, ein anatomisches Hindernis darstellen (3, 42, 43).

Invasive Behandlungsmöglichkeiten der Trigeminusneuralgie stellen neben der chirurgischen mikrovaskulären Dekompression die perkutane Ballon Mikrokompression, perkutane Rhizolyse durch Glycerol Injektion sowie perkutane Radiofrequenzrhizotomie des Ganglion trigeminale dar. (35, 36) Diese perkutanen Eingriffe haben gemeinsam, dass der Zugang über das Foramen ovale erfolgt. Das Vorliegen einer knöchernen Brücke kann daher ein anatomisches Hindernis bei der Kanülierung des Foramen ovale darstellen (3, 35). In mehreren radiologischen und anatomischen Studien wurde gezeigt, dass insbesondere Verknöcherungen des Lig. pterygoalare aufgrund ihrer Lage zu Schwierigkeiten bei der Kanülierung des Foramen ovale und somit auch Zugang zur Fossa cranii media führen können und daher von klinisch großer Bedeutung sind (3, 14, 17, 35, 44).

Ein anatomisches Hindernis durch Verknöcherungen des Lig. pterygospinale wird kontrovers diskutiert. In einigen Studien wird beschrieben, dass der Zugang zum Foramen ovale aufgrund der inferomedialen Lage der Knochenbrücke zum Foramen ovale nicht erschwert wird (17, 22). Andere Autoren beschreiben, dass das verknöcherte Lig. pterygospinale bei inferiorer und weniger medialer Lage zum Foramen ovale ebenfalls ein Hindernis für den Zugang darstellen kann. (3, 20, 23). So beschreiben Matys et al. (3) in ihrer radiologischen, neurochirurgischen Studie, dass alle untersuchten, verknöcherten Ligg. pterygoalaria ein anatomisches Hindernis bei einem transzygomatischen Zugang zum Foramen ovale darstellen. Bei submandibulären Zugangswegen zum Foramen ovale stellen die verknöcherten Bänder allerdings kein anatomisches Hindernis dar. (3). Im Vergleich dazu behinderten 54% der komplett verknöcherten Ligg. pterygospinalia und 24% der inkomplett verknöcherten Ligg. pterygospinalia einen geplanten submandibulären Zugang zum Foramen ovale, wohingegen der transzygomatische Zugang nach Hartel zum Foramen ovale von den Verknöcherungen nicht beeinflusst wurde (3). Bei der Ballon-Mikrokompression wird eine breitere Kanüle eingeführt. Bei einem durch eine

Knochenbrücke eingengtem Foramen ovale könnten dabei eventuell größere Schwierigkeiten bei diesem Eingriff auftreten (17).

Im Zuge der Schmerzbehandlung bei Kieferfrakturen oder Malignomen im Kieferbereich kann eine Nervenblockade des N. mandibularis durchgeführt werden. Auch bei diesen perkutanen Injektionen über meist laterale subzygomatische Zugangswege können die Knochenbrücken zu einem anatomischen Hindernis und Schwierigkeiten bei der Intervention führen (3, 6, 15, 44).

Biopsien bei Tumoren im Bereich des Sinus cavernosus können ebenfalls durch das Foramen ovale erfolgen, auch hierbei können die Knochenbrücken ein anatomisches Hindernis darstellen (6, 44).

Verknöcherungen des Lig. pterygospinale können auch Eingriffe in an die Fossa infratemporalis angrenzenden Kopfregionen behindern. Es wird beschrieben, dass die Verknöcherungen bei chirurgischen Zugangswegen durch die Fossa infratemporalis zum Spatium parapharyngeum oder zur Schädelbasis Hindernisse bilden können (3, 6).

Um Schwierigkeiten bei der Kanülierung des Foramen ovale zu vermeiden, wird empfohlen präinterventionell eine CT-Bildgebung mit 3D Rekonstruktion der knöchernen Schädelbasis oder eine intraoperative CT-gesteuerte Neuronavigation durchzuführen, um so die individuellen anatomischen Verhältnisse zu visualisieren und die Erfolgsrate der Eingriffe zu erhöhen (4, 13, 17, 45). Anstelle des typisch gewähltem transzygomatischen Zugang bei Eingriffen mit Kanülierung des Foramen ovale kann alternativ ein inframandibulärer Zugangsweg gewählt werden, um einem Hindernis durch eine Knochenbrücke zu entgehen. (15)

Das Wissen über die Existenz und die mögliche Lage der Ligg. pterygoalare et pterygospinale sowie deren Möglichkeit zur Ossifikation ist daher für die klinischen Fachbereiche der Radiologie, Neurologie, Neurochirurgie, Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, Zahnmedizin und Anästhesiologie von großer klinischer Relevanz (13, 15, 32).

Die Ligg. pterygoalare et pterygospinale sowie deren mögliche Verknöcherungen werden in deutsch- und englischsprachigen Textbüchern der Anatomie nur vereinzelt und unzureichend beschrieben (8, 26, 27, 29, 46).

Henry et al. (4) sowie Peçkala et al. (1) erstellten Metaanalysen betreffend der Prävalenz der Ligg. pterygospinale et pterygoalare. Die in den einzelnen Publikationen angegebenen

Prävalenzen weisen eine sehr hohe Streubreite auf. So schwankten zum Beispiel die Angaben zum Vorkommen einer vollständigen Verknöcherung des Lig. pterygospinale zwischen 0% und 16% (4). Das Vorkommen einer vollständigen Verknöcherung des Lig. pterygoalare liegt zwischen 0,7% und 43,3% (1). Eine komplette Verknöcherung des Lig. pterygospinale zeigte eine signifikant höhere Prävalenz beim männlichen Geschlecht (4). Eine komplette Verknöcherung des Lig. pterygoalare wies ebenfalls eine höhere Prävalenz beim männlichen Geschlecht auf, allerdings war dieser Unterschied statistisch nicht signifikant (1).

Aufgrund dieser Datenlage erscheinen hier weitere Studien, vor allem auch hinsichtlich Seiten-, Geschlechts- und Altersunterschieden, notwendig (1, 4).

Zur Evaluierung der Darstellbarkeit dieser verknöcherten Bänder sollten CT-Datensätze von entsprechenden anatomischen Präparaten angefertigt und verglichen werden. Dies könnte die Diagnostik am Lebenden möglicherweise verbessern.

1.3 Fragestellung und Hypothese der Studie

Die zentralen Fragestellungen der Studie sind:

- Wie häufig kommt es zu einer kompletten oder beginnenden Ossifikation der Ligg. pterygoalare et pterygospinale?
- Gibt es dabei Seiten- oder Geschlechtsunterschiede?
- Gibt es Unterschiede in Bezug auf das Alter (kindliches/juveniles versus adultes Skelett)?
- Können die erhobenen Befunde verlässlich auch mittels CT erhoben werden?

Daraus ergeben sich folgende Hypothesen:

- Das Vorkommen der inkomplett oder komplett ossifizierten Ligg. pterygoalare et pterygospinale zeigen keinen Seiten-, Geschlechter- oder Altersunterschied.
- Inkomplette und komplette Verknöcherung der Ligg. pterygoalare et pterygospinale können mittels CT-Bildgebung diagnostiziert werden.

2 Material und Methoden

2.1 Präparate

Für die Studie wurden sämtliche mazerierte Schädel der Museumssammlung des Lehrstuhls für makroskopische und klinische Anatomie auf das Vorkommen einer unvollständigen oder kompletten Verknöcherung des Lig. pterygoalare und des Lig. pterygospinale untersucht. Da die Schädelammlung des Lehrstuhls sowohl über adulte, als auch kindliche und juvenile Schädel beider biologischer Geschlechter verfügt, ist ein Vergleich der Prävalenz bezogen auf Alter und Geschlecht möglich.

Ausgeschlossen wurden Schädel mit Malformationen, wie z.B. einem Hydrocephalus, oder mit verletzter oder zerbrochener Schädelbasis im Bereich des Os sphenoidale. Es wurden insgesamt 591 Schädel untersucht. Nach Ausschluss verblieben 564 Schädel, die in die statistische Auswertung einbezogen werden konnten.

Die für diese Studie ermittelten Daten wurden pseudonymisiert, es wurden lediglich Präparatenummer sowie, falls bekannt, Geschlecht und Alter notiert. Sämtliche personenbezogenen Daten sind ausschließlich im Passwort-geschützten System des Lehrstuhls für makroskopische und klinische Anatomie gespeichert. Des weiteren wurde die Studie durch die Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz (EK-Nummer: 35-261 ex 22/23) genehmigt.

Insgesamt wurden 564 knöcherne Schädel (ergibt 1128 Seiten bzw. Fälle) im Rahmen dieser Studie untersucht und hinsichtlich der Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale ausgewertet. Das exakte Alter war für 370 Schädel in den Aufzeichnungen des Lehrstuhls dokumentiert. 225 davon waren zum Todeszeitpunkt 18 Jahre und älter (diese wurden als adulte Schädel kategorisiert), 145 Schädel waren jünger als 18 Jahre (diese wurden als kindlich/juvenile Schädel kategorisiert). Für die verbleibenden 194 Schädel existiert kein dokumentiertes Alter.

Von 344 Schädeln wurde das Geschlecht in den Aufzeichnungen des Lehrstuhls dokumentiert. Darunter waren 80 weibliche und 264 männliche Schädel. Bei den restlichen 220 Schädeln ist das Geschlecht unbekannt (siehe Abbildung 1).

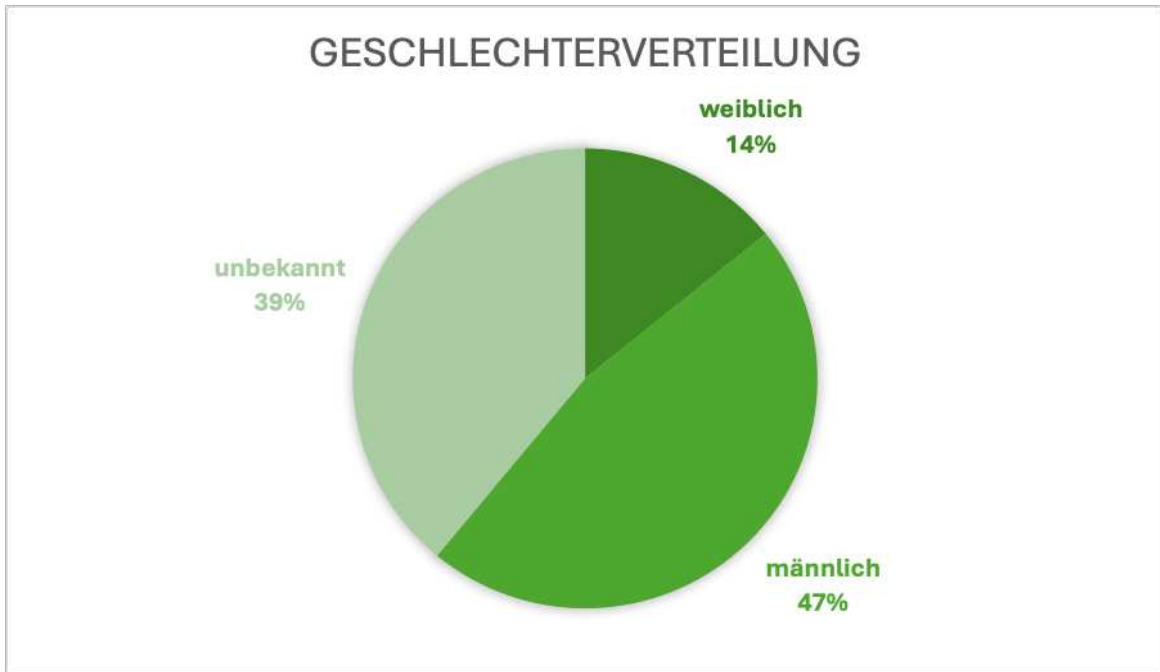


Abbildung 1: Geschlechterverteilung in der untersuchten Gesamtpopulation.

Die Daten sind angegeben in prozentualer Verteilung auf die gesamte Studienpopulation (564 Schädel).

2.2 Methode

Die Schädel wurden makroskopisch auf das Vorkommen und den Ausprägungsgrad von Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale untersucht. Die an den Schädeln erhobenen Befunde wurden fotografisch dokumentiert.

Je nach Grad der Verknöcherung wurden die Ergebnisse in jeweils drei Kategorien eingeteilt.

Die Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA) wurde in folgende Kategorien eingeteilt:

PA I: angedeutete bzw. beginnende Verknöcherung des Lig. pterygoalare (siehe Abbildung 2)

PA II: deutliche, aber nicht vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (siehe Abbildung 3)

PA III: vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (siehe Abbildung 4)

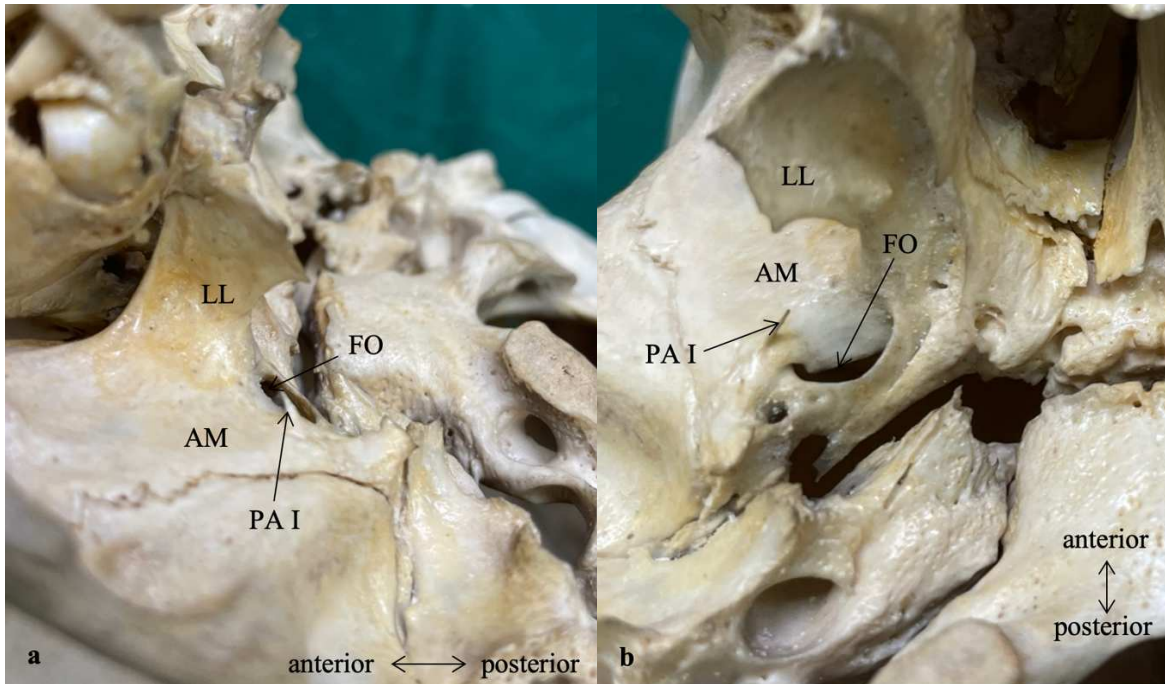


Abbildung 2: Beginnende Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA I)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit beginnender Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA I) auf der rechten Seite (AM: Ala major ossis sphenoidalis; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; FO: Foramen ovale)

b: Inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit beginnender Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA I) auf der rechten Seite (AM: Ala major ossis sphenoidalis; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; FO: Foramen ovale)

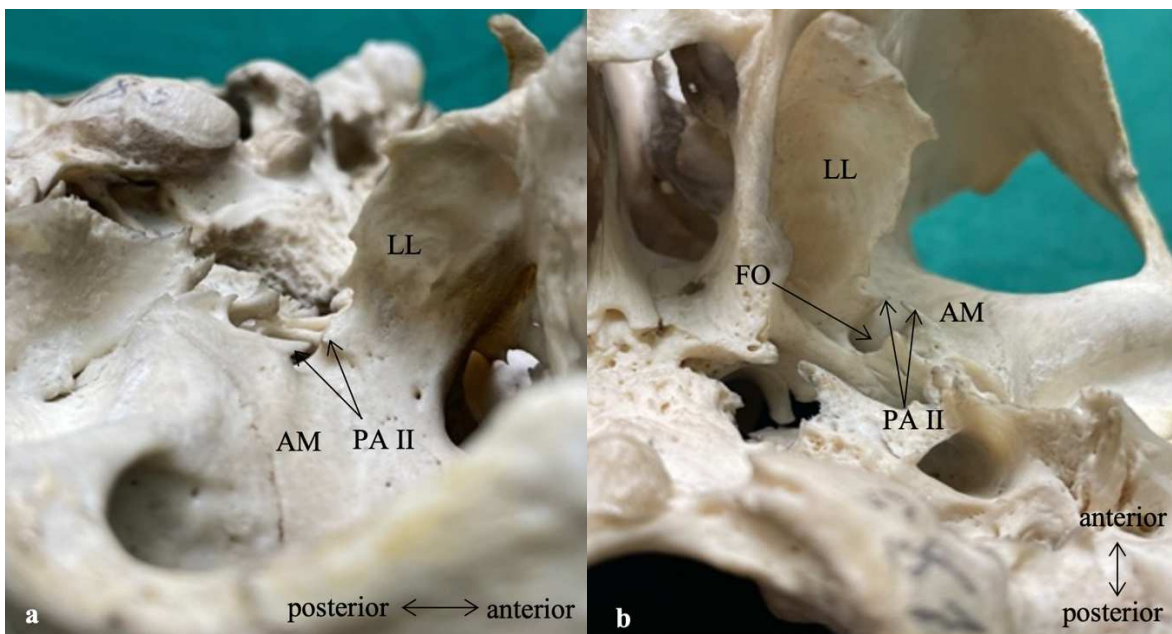


Abbildung 3: Unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA II)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit unvollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA II) auf der linken Seite (AM: Ala major ossis sphenoidalis; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus)

b: Inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit unvollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA II) auf der linken Seite (AM: Ala major ossis sphenoidalis; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; FO: Foramen ovale)

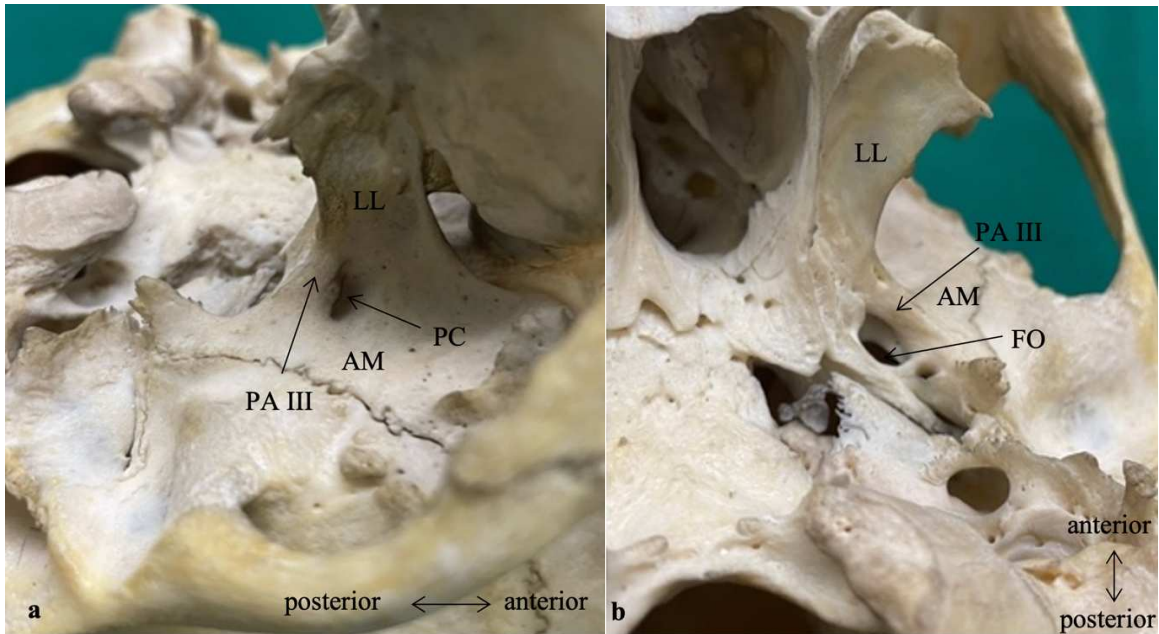


Abbildung 4: Vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare (PA III)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite (PC: Porus crotaphiticobuccinatorius; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; AM: Ala major ossis sphenoidalis)

b: Inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; AM: Ala major ossis sphenoidalis)

Analog wurde die Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS) in folgende Kategorien eingeteilt:

PS I: angedeutete bzw. beginnende Verknöcherung des Lig. pterygospinale (siehe Abbildung 5)

PS II: deutliche, aber nicht vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (siehe Abbildung 6)

PS III: vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (siehe Abbildung 7)

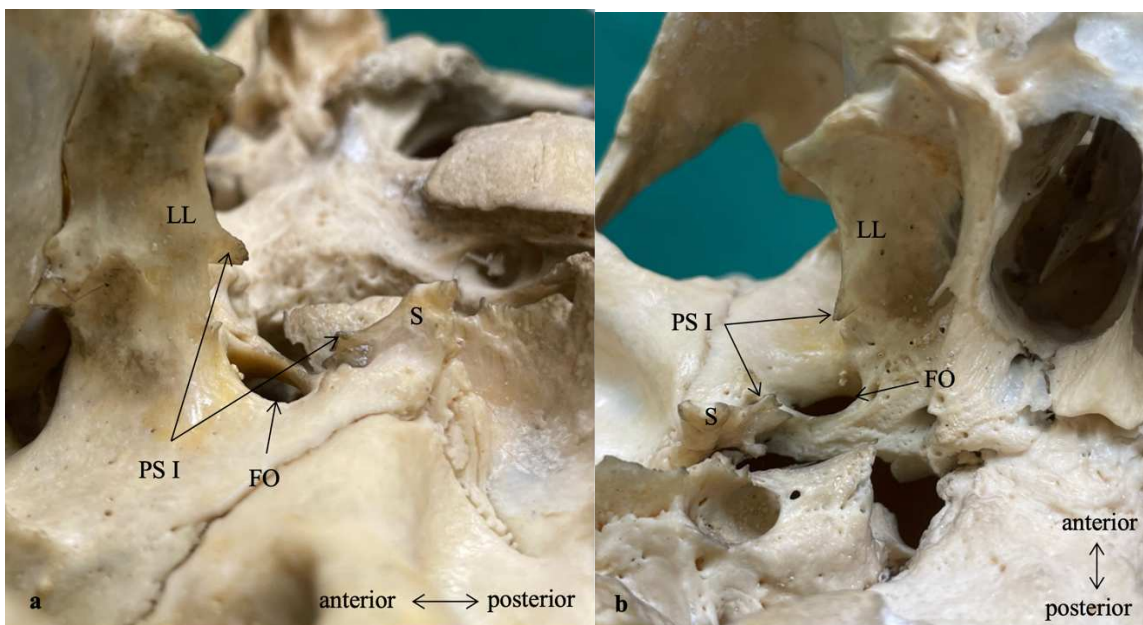


Abbildung 5: Beginnende Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS I)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit beginnender Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS I) auf der rechten Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

b: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit beginnender Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS I) auf der linken Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

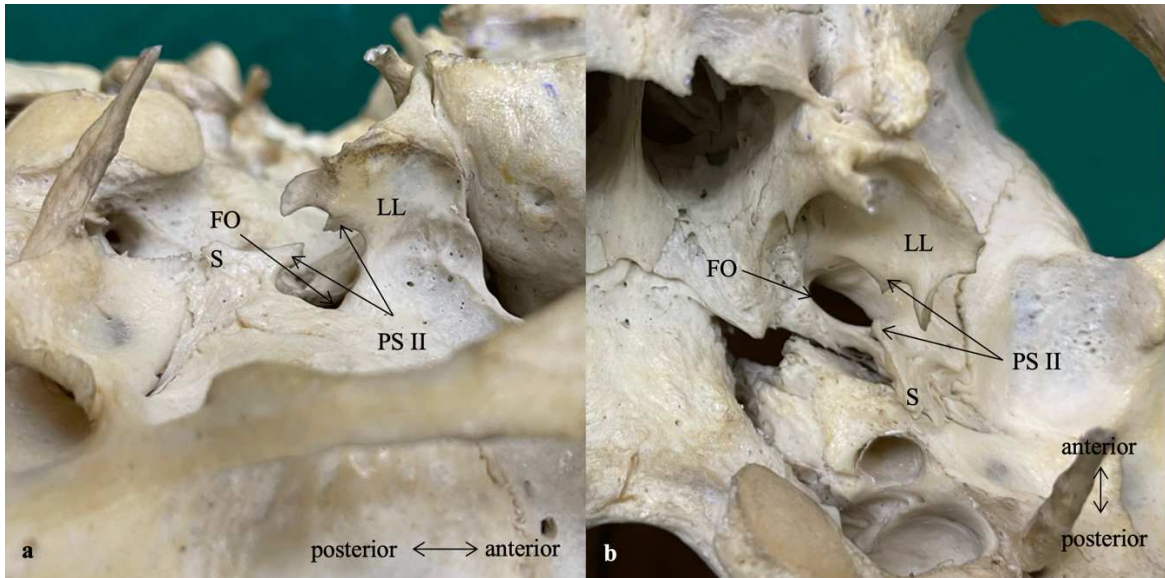


Abbildung 6: Unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS II)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit unvollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS II) auf der linken Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

b: Inferiore Ansicht eines Schädels mit unvollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS II) auf der linken Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

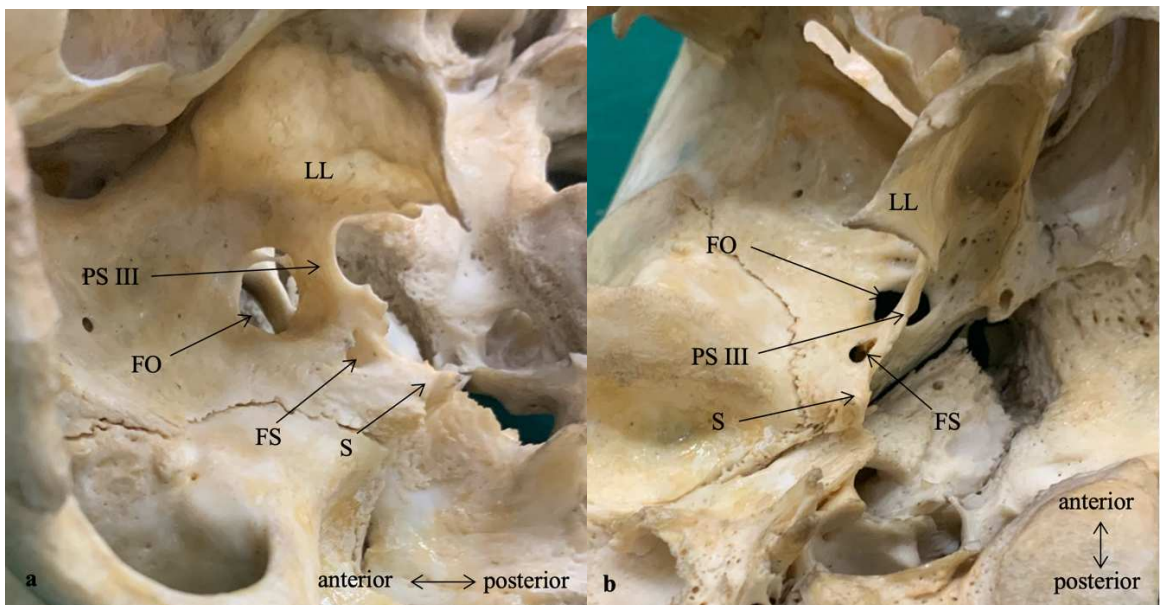


Abbildung 7: Vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale (PS III)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS III) auf der rechten Seite (FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

b: Inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS III) auf der rechten Seite (FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

Die Gesamtprävalenz des Vorhandenseins aller Grade der Verknöcherungen für jedes der beiden Bänder wurde auf die Zahl der untersuchten Individuen, also Schädel (n = 564) berechnet. Dabei wurde auch ermittelt, ob es ein- oder beidseits vorkam.

Die Prävalenzen der einzelnen Grade der Verknöcherung wurden in Bezug auf die untersuchten Seiten (n = 1128) berechnet. Für beides wurde ein Geschlechts-, Alters-, sowie Seitenvergleich angestellt, wobei beim Alter zwischen adult und kindlich/juvenil verglichen wurde.

Die Datenauswertung erfolgte mittels Excel (Microsoft Office Professional Plus 2016) und IBM SPSS Statistics 29 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

Bei Vorhandensein einer vollständigen Verknöcherung der ligamentären Strukturen wurde die Darstellbarkeit an bereits vorliegenden CT-Datensätzen evaluiert. Die CT-Untersuchungen wurden mittels Siemens SOMATOM Definition AS durchgeführt. Dabei wurden axiale, sagittale und koronare Schnitte mit einer Schichtdicke von 0,7mm und einem Inkrement von 1mm aufgenommen und mit der Software OsiriX Lite (Version 14.1, OsiriX Imaging Software, Genf, Schweiz) im Knochenfenster befundet und ausgewertet.

Zur besseren Illustration wurde zusätzlich für je einen Schädel mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare bzw. Lig. pterygospinale eine multiplanare Rekonstruktion erstellt. Diese bestand aus 42 Schichten in Längsachse des Foramen ovale (siehe Abbildung 8). Hierbei betrug die Schichtdicke 1mm und das Inkrement 0,5mm.



Abbildung 8: Achse in Längsrichtung des Foramen ovale für die multiplanare Rekonstruktion der CT-Datensätze

3 Ergebnisse

Insgesamt konnte bei 308 (54,6%) von den 564 untersuchten Schädeln auf mindestens einer Seite ein teilweise oder vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare und / oder Lig. pterygospinale beobachtet werden.

3.1 Lig. pterygoalare

151 (26,8%) aller untersuchten Schädel wiesen mindestens auf einer Seite ein teilweise oder vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare auf. In fast einem Drittel war dies sogar beidseits vorhanden. Bei einseitigem Vorkommen war es auf der rechten Seite geringfügig häufiger vorhanden (siehe Tabelle 1, Abbildung 9).

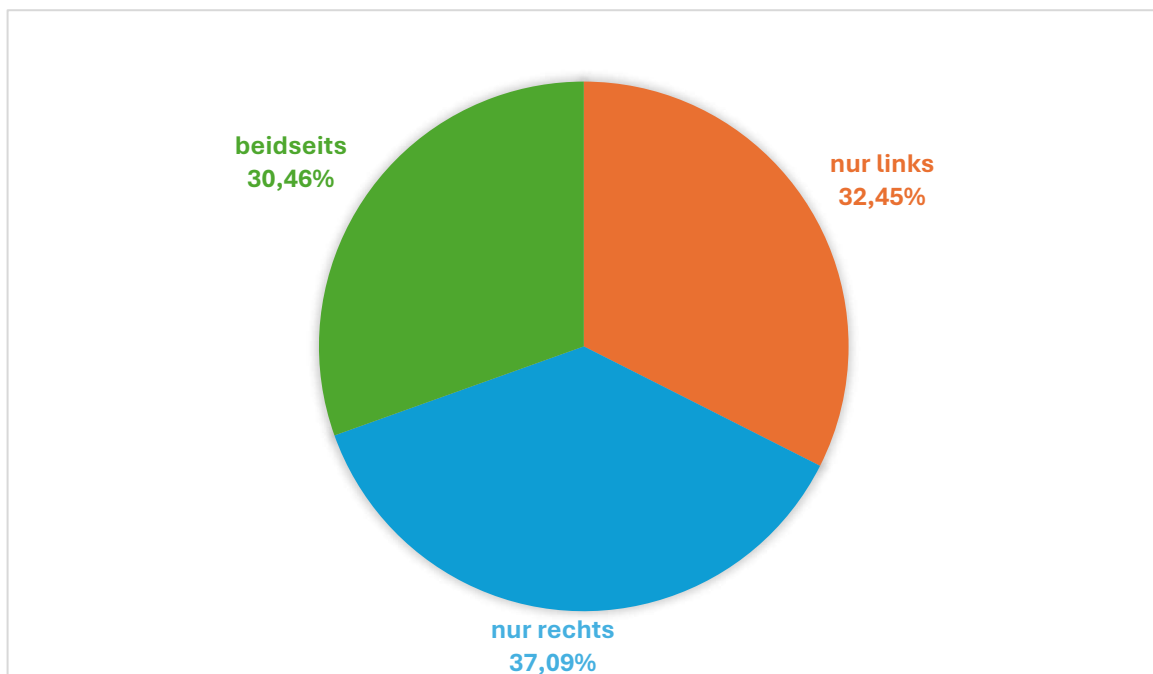


Abbildung 9: Seitenvergleich unter allen Schädeln mit Verknöcherung des Lig. pterygoalare

Die Daten sind angegeben in prozentualer Verteilung auf die gesamte Studienpopulation (564 Schädel).

Bei den weiblichen Schädeln war eine beidseitige Verknöcherung des Lig. pterygoalare geringfügig seltener vorhanden als bei den männlichen (25% bzw. 33,75%). Bei einseitig verknöchertem Lig. pterygoalare hatten dies beide Geschlechter etwas häufiger rechts. Schädel ≥ 18 Jahre zeigten in je ungefähr einem Drittel der Fälle eine Verknöcherung des Lig. pterygoalare nur rechts, nur links oder beidseits. Im Vergleich zeigten Schädel < 18 Jahre diese häufiger nur auf der rechten Seite. Insgesamt konnten aber im Alters- und

Geschlechtervergleich ähnliche Tendenzen für die Lage des verknöcherten Lig. pterygoalare erkannt werden (siehe Tabelle 1).

	Gesamt n=151	weiblich (n=12)	männlich (n=80)	≥18 Jahre (n=70)	<18 Jahre (n=31)
nur rechts	56 (37,09%)	5 (41,67%)	29 (36,25%)	25 (35,71%)	13 (41,93%)
nur links	49 (32,45%)	4 (33,33%)	24 (30,00%)	23 (32,86%)	8 (25,81%)
beidseits	46 (30,46%)	3 (25,00%)	27 (33,75%)	22 (31,43%)	10 (32,26%)

Tabelle 1: Geschlechter- und Altersvergleich bezogen auf die Lage des verknöcherten Lig. pterygoalare.

Unter allen untersuchten Fällen (n=1128) konnte ein vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare in 1,24% beobachtet werden. Unvollständige Verknöcherungen waren deutlich häufiger vorhanden, wobei der Verknöcherungsgrad PA I mit 12,06% am häufigsten und PA II in immerhin 4,17% (siehe Tabelle 2) beobachtet wurde.

	PA I	PA II	PA III
n=1128	136	47	14
Prävalenz (%)	12,06%	4,17%	1,24%

Tabelle 2: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygoalare (PA I – III).

Im Seitenvergleich fanden sich auf der linken Seite geringfügig häufiger vollständige Verknöcherungen des Lig. pterygoalare (1,77% vs. 0,71%).

Im Geschlechtervergleich konnte unter den weiblichen Schädeln häufiger eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare beobachtet werden (2,50% vs. 0,38%). Hingegen war

die unvollständige Verknöcherung des Grades PA I unter den männlichen Schädeln häufiger vorhanden als unter den weiblichen (14,77% vs. 4,38%).

Im Altersvergleich zeigten sich alle Grade der Verknöcherung geringfügig häufiger unter den adulten Schädeln im Vergleich zu den kindlichen und juvenilen Schädeln. Eine vollständige Verknöcherung konnte bei 1,11% der Schädel ≥ 18 Jahre gefunden werden, bei den Schädeln < 18 Jahre nur in 0,69% (siehe Tabelle 3).

	Gesamt (n=1128)	Rechts (n=564)	Links (n=564)	weiblich (n=160)	männlich (n=528)	≥ 18 Jahre (n=450)	< 18 Jahre (n=290)
PA I	136 (12,06%)	76 (13,48%)	60 (10,64%)	7 (4,38%)	78 (14,77%)	64 (14,22%)	31 (10,69%)
PA II	47 (4,17%)	22 (3,90%)	25 (4,43%)	4 (2,50%)	27 (5,11%)	23 (5,11%)	8 (2,76%)
PA III	14 (1,24%)	4 (0,71%)	10 (1,77%)	4 (2,50%)	2 (0,38%)	5 (1,11%)	2 (0,69%)

Tabelle 3: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygoalare im Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich.

3.2 Lig. pterygospinale

239 der 564 untersuchten Schädel (42,4%) wiesen mindestens auf einer Seite ein teilweise oder vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale auf.

Eine beidseitige Verknöcherung zeigte sich in über der Hälfte der Fälle. Zwischen einseitig linkem und einseitig rechtem Vorkommen konnte kein wesentlicher Unterschied beobachtet werden (siehe Abbildung 10, Tabelle 4).

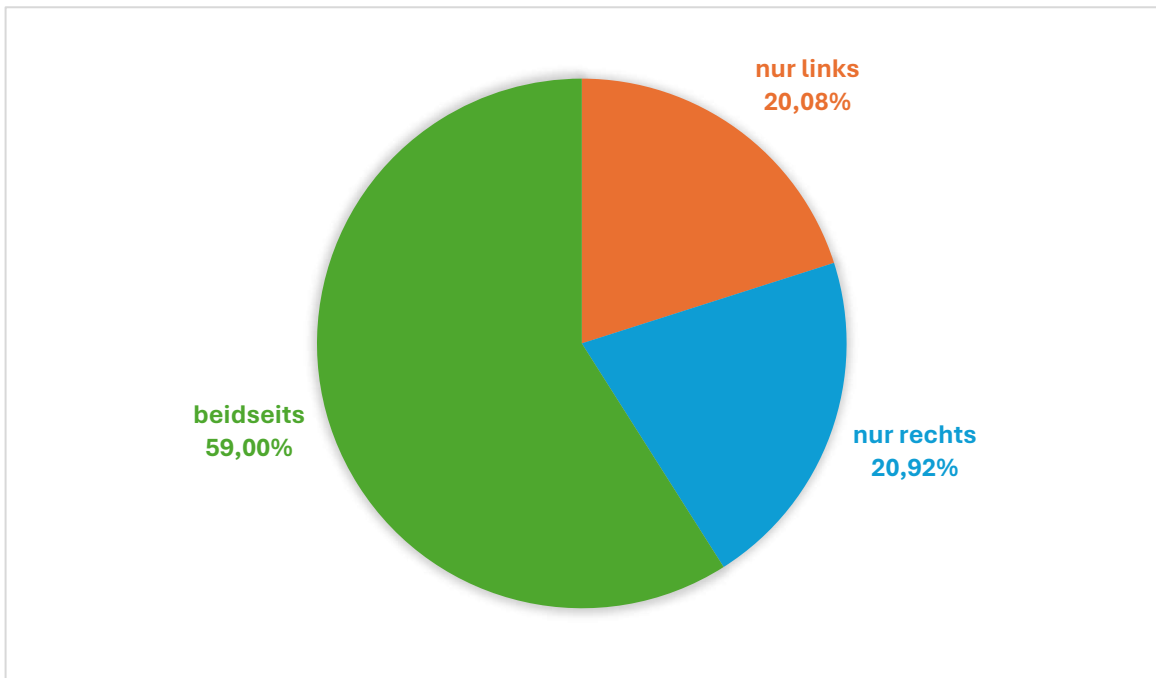


Abbildung 10: Seitenvergleich unter allen Schädeln mit Verknöcherung des Lig. pterygospinale
 Die Daten sind angegeben in prozentualer Verteilung auf die gesamte Studienpopulation (564 Schädel).

Die untersuchten weiblichen Schädel wiesen häufiger nur rechts eine Verknöcherung des Lig. pterygospinale auf, wohingegen die untersuchten männlichen Schädel häufiger nur auf der linken Seite eine Verknöcherung aufwiesen.

Unter den Schädeln ≥ 18 Jahren konnte häufiger eine beidseitige Verknöcherung beobachtet werden als unter den Schädeln < 18 Jahre (62,86% vs. 46,67%). Eine einseitige Verknöcherung konnte im Gegensatz dazu bei den Schädeln < 18 Jahre häufiger beobachtet werden (siehe Tabelle 4).

	n=239	weiblich (n=28)	männlich (n=126)	≥18 Jahre (n=105)	<18 Jahre (n=45)
nur rechts	50 (20,92%)	9 (32,14%)	20 (15,87%)	20 (19,05%)	13 (28,89%)
nur links	48 (20,08%)	4 (14,29%)	31 (24,60%)	19 (18,10%)	11 (24,44%)
beidseits	141 (59,00%)	15 (53,57%)	75 (59,52%)	66 (62,86%)	21 (46,67%)

Tabelle 4: Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich der Verknöcherungen des Lig. pterygospinale

Unter allen Fällen (n=1128) wurde in 2,22% ein vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale beobachtet. Auch hier zeigten die unvollständigen Verknöcherungsgrade eine höhere Prävalenz als eine vollständige Verknöcherung (siehe Tabelle 5).

	PS I	PS II	PS III
n=1128	212	143	25
Prävalenz (%)	18,79%	12,68%	2,22%

Tabelle 5: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygospinale (PS I – III)

Alle drei definierten Verknöcherungsgrade waren im Seitenvergleich auf der linken Seite geringfügig häufiger vorhanden.

Eine vollkommene Verknöcherung zeigte im Geschlechtervergleich keine wesentlichen Unterschiede (2,50% vs. 2,66%). Die unvollständigen Verknöcherungen des Lig. pterygospinale wurden allerdings häufiger unter den männlichen als unter den weiblichen Schädeln beobachtet.

Alle Verknöcherungsgrade wurden etwas häufiger bei Schädeln ≥ 18 Jahre als bei Schädeln < 18 Jahre beobachtet (siehe Tabelle 6).

	Gesamt (n=1128)	Rechts (n=564)	Links (n=564)	weiblich (n=160)	männlich (n=528)	≥ 18 Jahre (n=450)	< 18 Jahre (n=290)
PS I	212 (18,79%)	110 (19,50%)	102 (18,09%)	25 (15,63%)	109 (20,64%)	88 (19,56%)	40 (13,79%)
PS II	143 (12,68%)	71 (12,59%)	72 (12,77%)	14 (8,75%)	77 (14,58%)	68 (15,11%)	21 (7,24%)
PS III	25 (2,22%)	10 (1,77%)	15 (2,66%)	4 (2,50%)	15 (2,84%)	15 (3,33%)	5 (1,72%)

Tabelle 6: Prävalenzen der Verknöcherungsgrade des Lig. pterygospinale im Seiten-, Geschlechter- und Altersvergleich

3.3 Darstellbarkeit der Verknöcherungen in CT-Datensätzen

Die vollständigen Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale konnten an den koronaren, sagittalen sowie axialen CT-Schnitten sowie den multiplanaren Rekonstruktionen vollständig nachverfolgt werden.

3.3.1 Lig. pterygoalare

Am Beispiel eines vollständig verknöcherten Lig. pterygoalare auf der linken Seite eines Schädels (siehe Abbildung 11) wurde dessen Diagnostizierbarkeit in der multiplanaren Rekonstruktion der CT-Daten gezeigt:

Zunächst sucht man sich die Foramina ovale et spinosum. Dazu orientiert man sich am besten an der deutlich sichtbaren Spina ossis sphenoidalis und der Lamina lateralis des Proc. pterygoideus (siehe Abbildung 12a). Lateral dazu kann der laterale Rand des Foramen ovale bestimmt werden (siehe Abbildung 12b+c). Wiederum lateral dazu erscheint in Folge das

vollständig verknöcherte Lig. pterygoalare. Man sieht, dass es die Wurzel der Lamina lateralis des Proc. pterygoideus und die kaudale Seite der Ala major ossis sphenoidalis verbindet. Der dadurch entstandenen Porus crotaphiticobuccinatorius kann ebenfalls eindeutig diagnostiziert werden (siehe Abbildung 12d-h). Die Verknöcherung kann in ihrer gesamten Ausdehnung verfolgt werden. In Abbildung 12h scheint der Porus crotaphiticobuccinatorius nach kaudal hin eine Öffnung zu besitzen. Dies stellt eine Kerbe dar, die der laterale Rand des verknöcherten Bandes aufweist und welche auch makroskopisch sichtbar ist (siehe Abbildung 11a, Abbildung 12h).

Der Verlauf der Verknöcherung kann auf der multiplanaren Rekonstruktion detailliert und vollständig nachverfolgt werden. Die Lage lateral zum Foramen ovale ist deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 11, Abbildung 12).

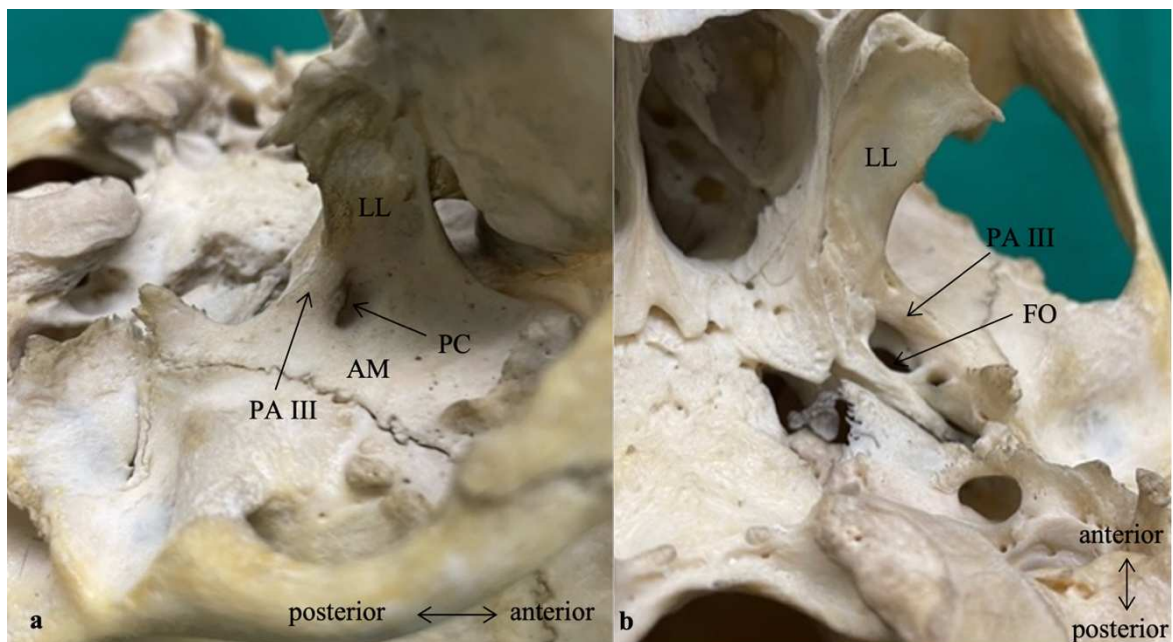


Abbildung 11: Vollständig verknöchertes Lig. pterygoalare links (PA III)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite (PC: Porus crotaphiticobuccinatorius; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; AM: Ala major ossis sphenoidalis)

b: inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite (FO: Foramen ovale; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus)

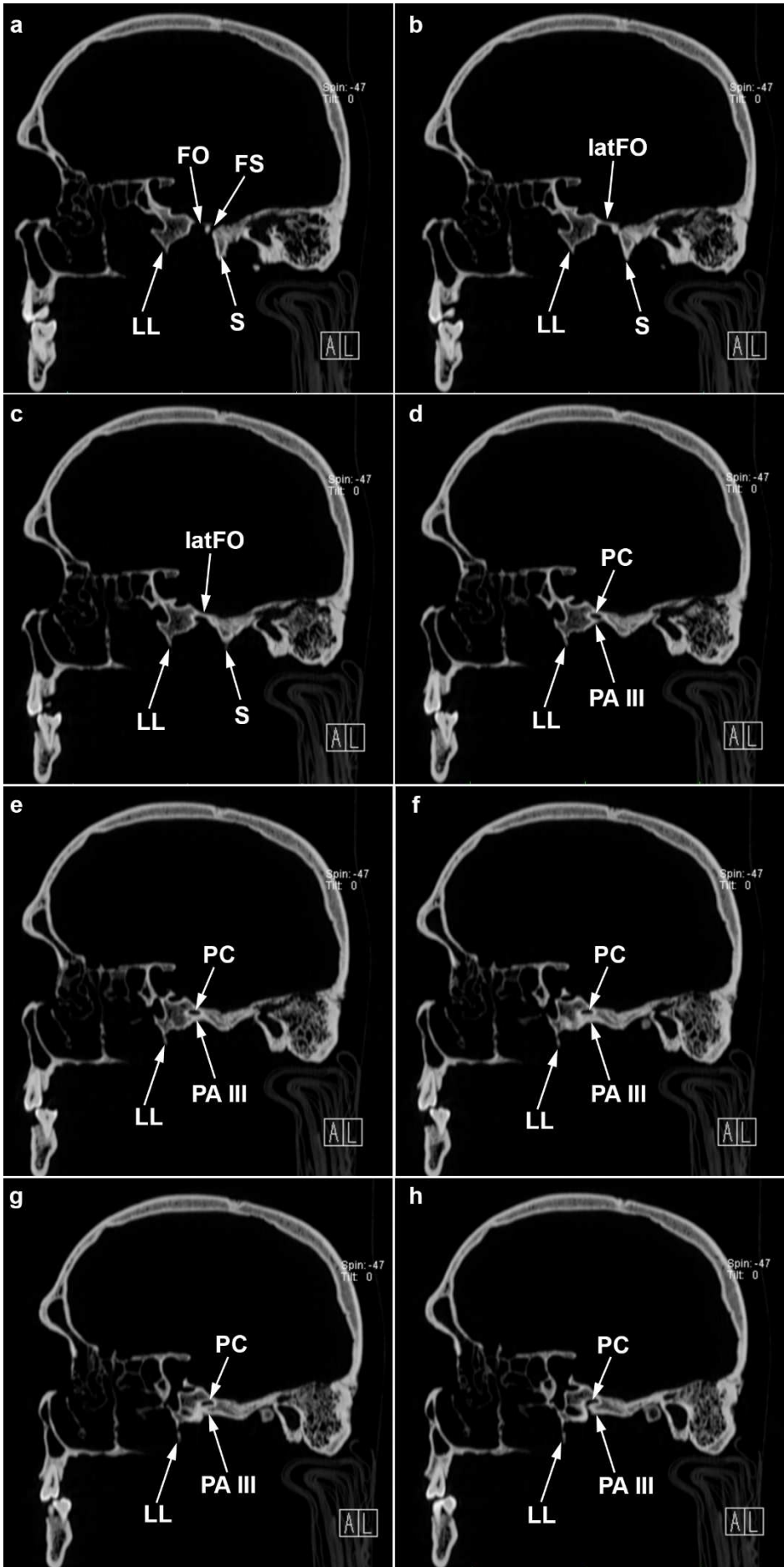


Abbildung 12: Multiplanare Rekonstruktion eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygoalare (PA III) auf der linken Seite

Die Schnitte **a – h** verlaufen in Folge von medial nach lateral.

(A: anterior; L: left; FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis; S: Spina ossis sphenoidalis; latFO: lateraler Rand des Foramen ovale; PA III: vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare; PC: Porus crotaphiticobuccinatorius)

3.3.2 Lig. pterygospinale

Auch am Beispiel eines vollständig verknöcherten Lig. pterygospinale auf der rechten Seite eines Schädels (siehe Abbildung 13) wurde dessen Diagnostizierbarkeit in der multiplanaren Rekonstruktion der CT-Daten gezeigt:

Zunächst sucht man sich die Foramina ovale et spinosum. Dazu orientiert man sich erneut an der auch in diesem Fall deutlich sichtbaren Spina ossis sphenoidalis und der Lamina lateralis des Proc. pterygoideus (siehe Abbildung 14a+b). Inferior des Foramen ovale wird die vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale sichtbar. Man sieht, dass sie den posterioren Rand der Lamina lateralis des Proc. pterygoideus und die Spina ossis sphenoidalis verbindet. Die Verknöcherung kann in ihrer gesamten Ausdehnung verfolgt werden (siehe Abbildung 14c-f). Auf dem am lateralen Rand des Foramen ovale angelangten CT-Schnitt, kann nur noch der Ansatz der knöchernen Brücke an der Spina ossis sphenoidalis beobachtet werden (siehe Abbildung 14f).

Der Verlauf der Verknöcherung kann auf der multiplanaren Rekonstruktion detailliert und vollständig nachverfolgt werden. Die Lage inferior zum Foramen ovale ist deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 13, Abbildung 14).

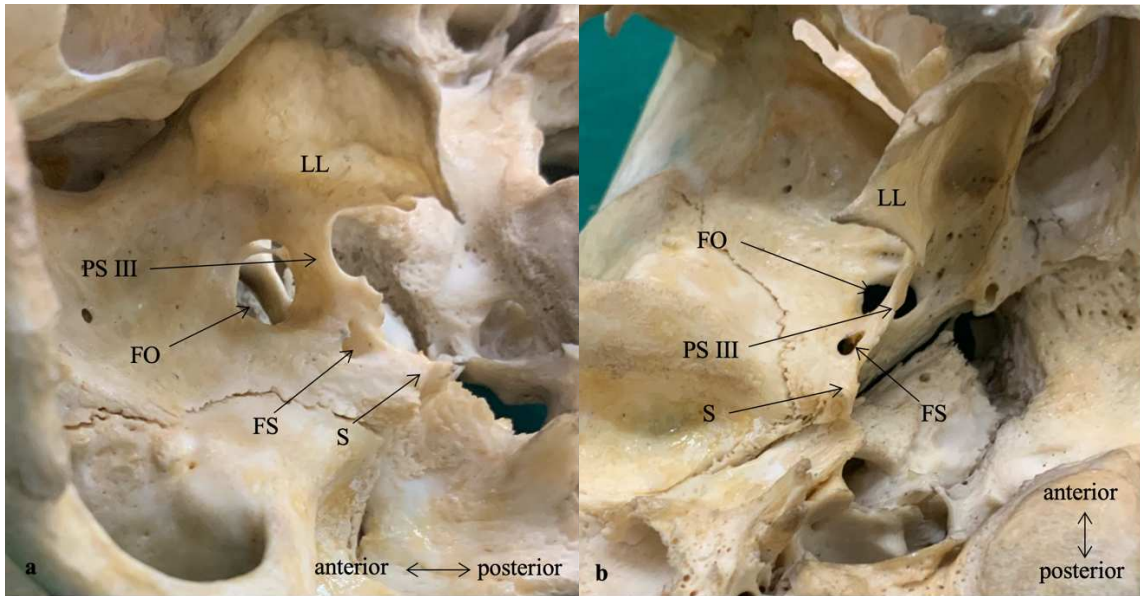


Abbildung 13: Vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale rechts (PS III)

a: Schräg-laterale Ansicht eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS III) auf der rechten Seite (FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

b: Inferiore Ansicht des gleichen Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale (PS III) auf der rechten Seite (FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis processus pterygoideus; S: Spina ossis sphenoidalis)

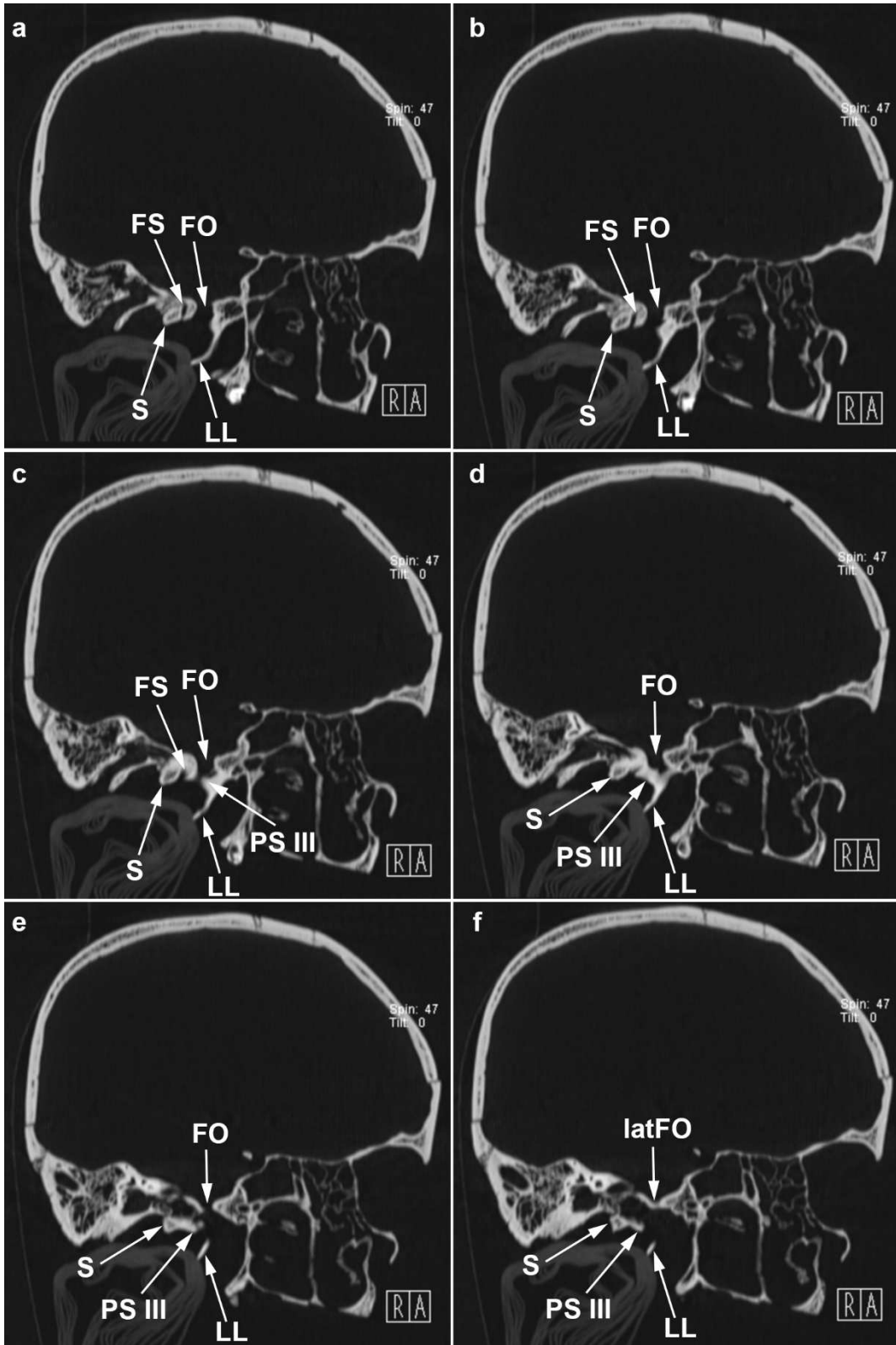


Abbildung 14: Multiplanare Rekonstruktion eines Schädels mit vollständig verknöchertem Lig. pterygospinale(PS III) auf der rechten Seite

Die Schnitte a-f verlaufen in Folge von medial nach lateral.

(A: anterior; R: right; FO: Foramen ovale; FS: Foramen spinosum; LL: Lamina lateralis; S: Spina ossis sphenoidalis; latFO: lateraler Rand des Foramen ovale; PS III: vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale)

4 Diskussion

4.1 Antworten auf die Forschungsfragen und Vergleich mit bereits publizierten Studien

Die Studie untersuchte die Häufigkeit der unvollständigen und vollständigen Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale, sowie mögliche Seiten-, Geschlechts- und Altersunterschiede. Außerdem wurde die Möglichkeit der Diagnostik einer Verknöcherung anhand von CT-Bildern evaluiert.

4.1.1 Vergleich der Prävalenzen

Die Ergebnisse zeigen, dass (teilweise) Verknöcherungen des Lig. pterygoalare in 26,8 % und des Lig. pterygospinale in 42,4 % der Fälle auftraten.

Bereits Hyrtl (2) beschrieb 1862, dass es sich aufgrund ihres Vorkommens nebeneinander bei den Ligg. pterygoalare et pterygospinale um zwei unterschiedliche Strukturen handeln muss. Ebenso in dieser Arbeit fiel auf, dass die Verknöcherungen gleichzeitig an derselben Seite eines Schädels vorkommen können, auch wenn keine Häufigkeiten dafür erhoben wurden. Eine vollständige Verknöcherung beider Bänder konnte auf der gleichen Seite allerdings nicht beobachtet werden.

Ryu et al. (6) konnten bei 2,8% der untersuchten 284 Seiten eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare beobachten. Pełkala et al. (1) erstellten eine Metaanalyse zu den Prävalenzen der Verknöcherungen des Lig. pterygoalare. Nach Einschluss von 25 Publikationen und insgesamt 16.168 Schädeln wurde eine Gesamtprävalenz für die vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare von 4,4% erhoben. Dabei wurden auch die Prävalenzen in Bezug auf die geografische Herkunft der Studie erhoben. Im Vergleich zeigte sich eine vollständige Verknöcherung in europäischen Studien am seltensten, nämlich mit einer Gesamtprävalenz von 2,6% (1). In der aktuellen Studie wurde eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare in 1,24% der untersuchten Seiten beobachtet werden. Die Ergebnisse liegen daher etwas unter den bisherigen Angaben zur Häufigkeit einer vollständigen Verknöcherung.

Unvollständige Verknöcherungsgrade wurden in dieser Studie in zwei Kategorien (angedeutete bzw. beginnende und deutliche, nicht vollständige Verknöcherung) unterteilt, was in den bisherigen Studien nicht erfolgte. Dabei wurde festgestellt, dass eine beginnende

Verknöcherung in 12,06% und eine deutliche Verknöcherung in 4,17% der untersuchten Seiten auftrat. Ryu et al. (6) ermittelten in ihrer Studie eine Prävalenz der unvollständigen Verknöcherung von 5,6% bezogen auf alle untersuchten Seiten, was unserem Wert bezogen auf die deutlichen Verknöcherung nahekommt. In der Metaanalyse von Pękala et al. (1) belief sich die Gesamtprävalenz unvollständiger Verknöcherung des Lig. pterygoalare in anatomischen Studien auf 7,1%. Beim Vergleich mit den in dieser Arbeit erhobenen Prävalenzen muss allerdings berücksichtigt werden, dass beim Großteil der früheren Publikationen die Prävalenz bezogen auf ganze Schädel, nicht auf untersuchte Seiten berechnet wurde. Beidseitige Verknöcherung zählen daher in diesen Studien lediglich als ein Fall, was einen direkten Vergleich der Ergebnisse erschwert.

Ryu et al. (6) beobachteten hingegen in nur 1,4% der 284 untersuchten Seiten eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale. Henry et al. (4) erstellten eine Metaanalyse betreffend die Prävalenz der Verknöcherungen des Lig. pterygospinale. Nach Einschluss von 35 Studien und insgesamt 14.047 Schädeln wurde die Gesamtprävalenz einer vollständigen Verknöcherung des Lig. pterygospinale von 4,4% beobachtet. Auch in dieser Studie wurde eine geografische Analyse der Prävalenzen angestellt. Am häufigsten wurde ein vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale in europäischen Studien gefunden (4,9%) (4). In der aktuellen Studie konnte beim Lig. pterygospinale in 2,22% der untersuchten Seiten eine vollständige Verknöcherung beobachtet werden. Dieser Wert liegt somit zwischen den Werten von Ryu et al. (6) und Henry et al. (4).

In dieser Studie wurden die unvollständigen Verknöcherungen des Lig. pterygospinale anders als in bisherigen Studien in zwei Grade (angedeutete bzw. beginnende und deutliche, nicht vollständige Verknöcherung) unterteilt. Dabei wurde beobachtet, dass eine beginnende Verknöcherung in 18,79% und eine deutlich ausgeprägte Verknöcherung in 12,68% der untersuchten Seiten auftrat. Ryu et al. (6) kamen in ihrer Studie auf eine Prävalenz unvollständiger Verknöcherung unter allen untersuchten Seiten von 16,6%. In der Metaanalyse von Henry et al. (4) wurde eine Gesamtprävalenz unvollständiger Verknöcherung des Lig. pterygospinale in anatomischen Studien von 11,4% beobachtet. Auch hier muss beim Vergleich der Prävalenzen beachtet werden, dass in den meisten früheren Publikationen die Prävalenzen bezogen auf untersuchte Schädel, nicht wie in dieser Arbeit bezogen auf untersuchte Seiten berechnet wurde.

In dieser Arbeit wurde bei beiden Bändern eine unvollständige Verknöcherung häufiger als vollständige Verknöcherungen beobachtet. Gleiche Tendenzen lassen sich in früheren publizierten Studien erkennen (1, 4, 6).

4.1.2 Seitenvergleich

In dieser Studie konnte eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare auf der rechten Seite in 0,71% beobachtet werden, auf der linken Seite in 1,77%. Deutlicher war diese Tendenz zur rechten Seite bei Ryu et al. (6) zu sehen. Dort wurde eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare auf der rechten Seite in 4,2% der Fälle, auf der linken Seite lediglich in 1,4% der Fälle beobachtet.

In dieser Arbeit wurden Verknöcherungen des Lig. pterygoalare häufiger unilateral als bilateral beobachtet. Eine unilaterale Verknöcherung wurde geringfügig häufiger auf der rechten Seite beobachtet (nur rechts: 37,09%, nur links 32,45%, beidseits 30,46%). Im Gegensatz dazu zeigten Pękala et al. (1) in ihrer Metaanalyse, dass sowohl vollständige als auch unvollständige Verknöcherungen des Lig. pterygoalare am häufigsten unilateral und dabei auf der linken Seite auftreten.

Eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale konnte in dieser Arbeit etwas häufiger links als rechts (2,66% vers. 1,77%) beobachtet werden. Ähnlich beobachteten auch Ryu et al. (6) ein vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale häufiger auf der linken Seite (2,1% vers. 0,7%).

In dieser Studie konnte eine beginnende bis komplette Verknöcherung des Lig. pterygospinale unter allen Schädeln mit einer Verknöcherung auf mindestens einer Seite häufiger beidseitig als einseitig gefunden werden. Im Falle einer einseitigen Verknöcherung konnte zwischen der linken und rechten Seite kein erheblicher Unterschied festgestellt werden (nur rechts 20,92%, nur links 20,08%, beidseits 59,00%). Umgekehrt war dies in der Metaanalyse von Henry et al. (4). Bei 23 eingeschlossenen Studien konnte sowohl eine unvollständige als auch eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale häufiger einseitig als beidseitig gefunden werden. Bei einseitigem Auftreten wurde häufiger auf der linken Seite eine Verknöcherung beobachtet.

Die Daten dieser und früherer Studien zeigen daher, dass es in den untersuchten Stichproben nur geringfügige Seitenunterschiede bei Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale gibt.

4.1.3 Geschlechtervergleich

Im Geschlechtervergleich dieser Studie konnte eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare bei weiblichen Schädeln etwas häufiger beobachtet werden als bei männlichen Schädeln (2,5% vs. 0,38%). Unvollständige Verknöcherungsgrade konnten hingegen bei männlichen Schädeln häufiger beobachtet werden. Umgekehrt zeigt sich in der Metaanalyse von Pękala et al. (1), dass vollständige Verknöcherungen des Lig. pterygoalare häufiger bei männlichen Schädeln als bei weiblichen Schädeln auftraten (6,7% vs. 4,5%). Unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare konnten allerdings auch dort häufiger bei männlichen Schädeln erfasst werden (1).

Beim Lig. pterygospinale trat eine vollständige Verknöcherung in dieser Arbeit geringfügig häufiger bei den männlichen als bei den weiblichen Schädeln auf (2,84% vs. 2,5%). Unvollständige Verknöcherungen konnten auch beim Lig. pterygospinale etwas häufiger bei männlichen Schädeln beobachtet werden. Die Metaanalyse von Henry et al. (4) zeigte ebenfalls - allerdings deutlicher - bei den männlichen Schädeln eine signifikant höhere Gesamtprävalenz auf (5,7% vs. 2,4%). Auch eine unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygospinale konnte dabei wiederum häufiger bei männlichen Schädeln erfasst werden (4).

Abgesehen davon, dass in der aktuellen Studie die komplette Verknöcherung des Lig. pterygoalare häufiger bei weiblichen Individuen beobachtet wurde, zeigt die aktuelle Gesamtdatenlage dieser Stichproben eher eine Tendenz zu einem - zumindest etwas - häufigerem Vorkommen von kompletten und inkompletten Verknöcherungen beider Bänder beim männlichen Geschlecht.

4.1.4 Altersvergleich

Eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare konnte unter allen untersuchten Seiten <18 Jahre in 0,69% beobachtet werden. Die untersuchten Seiten ≥ 18 Jahre wiesen mit 1,11% etwas häufiger eine vollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare auf.

Beim Lig. pterygospinale konnte eine vollständige Verknöcherung in 1,72% unter allen untersuchten Seiten <18 Jahre gefunden werden. Bei den Seiten ≥ 18 Jahre zeigte sich mit 3,33% ebenfalls etwas häufiger eine vollständige Verknöcherung.

Auch unvollständige Verknöcherungsgrade beider Bänder konnten bei den kindlichen und juvenilen Schädeln seltener als bei den adulten Schädeln gefunden werden.

Zusammenfassend traten alle Grade der Verknöcherung bei kindlichen und juvenilen Schädeln zwar auf, jedoch konnten unter adulten Schädeln stets etwas höhere Prävalenzen beobachtet werden.

Nach ausführlicher Literaturrecherche konnte nur eine anatomische Studie gefunden werden, im Zuge derer an kindlichen und juvenilen Schädeln die Häufigkeit der Verknöcherungen des Lig. pterygospinale untersucht wurde. Allerdings untersuchten Krmpotić-Nemanić et al. (47) keine vollständigen Schädel, sondern 20 isolierte Ossa sphenoidalia im Alter zwischen fünf und 17 Jahren. Dabei konnte unter allen untersuchten Keilbeinen kein einziges vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale beobachtet werden (47). Dies ist evtl. auf die sehr geringe Fallzahl zurückzuführen. Umgekehrt zeigten Esen et al. (24) in ihrer radiologischen Studie an CT-Bilder von 500 Kindern im Alter <18 Jahre das Vorkommen vollständiger und unvollständiger Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale. Unter den untersuchten 1000 Seiten konnte in 2,4% eine vollständige und in 5,4% eine unvollständige Verknöcherung des Lig. pterygoalare beobachtet werden. Ein vollständig verknöchertes Lig. pterygospinale konnte in 7% gefunden werden, ein unvollständig verknöchertes in 17,6% (24). Diese Werte liegen deutlich über den von uns beobachteten Zahlen. In Summe ist die Datenlage kindlicher und juveniler Schädeln allerdings noch sehr klein, was den Bedarf weiterer Untersuchungen (anatomisch und radiologisch) aufzeigt.

Durch die Ergebnisse der aktuellen Studie sowie der Studie von Esen et al. (24) kann die Theorie unterstützt werden, dass diese Knochenbrücken als phylogenetisches Überbleibsel entstehen könnten, da sich auch schon in jungen Jahren vorhanden sind. Andererseits kann auch die Theorie, dass diese Verknöcherungen sekundär im Laufe des Lebens entstehen nicht abgewiesen werden. Die aktuelle Studie zeigt, dass alle Verknöcherungsgrade beider Bänder bei adulten Schädeln etwas häufiger als bei juvenilen Schädeln vorkommen. Weitere Studien in diese Richtung sind daher notwendig. Zu diesem Schluss sind auch schon Pękala et al. (1) gekommen. Sie empfehlen eine Kohortenstudie, im Zuge derer im kindlichen Alter und im Erwachsenenalter das Vorkommen an denselben Patienten analysiert werden soll, um den Einfluss von sekundärer Ossifikation auf die Verknöcherung dieser Bänder genauer zu untersuchen (1).

4.1.5 CT

Rosa et al. (35) zeigten bereits, dass unvollständige und vollständige Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale mittels Röntgenaufnahmen in der Hirtz-Axial Technik gut visualisiert werden können. Auch Matys et al. (3) analysierten in ihrer retrospektiven Studie 200 CT-Scans von Nasennebenhöhlen- bzw. Innenohraufnahmen bezüglich der Darstellbarkeit von Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale. Sie erstellten dazu MIP (maximum intensity projection)-Rekonstruktionen. Verknöcherungen beider Bänder wurden auf den CT-Bildern als leicht nachweisbar beschrieben. Es wurde geschlussfolgert, dass präinterventionelle Bildgebung mittels CT zielführend sei, was vor bzw. während perkutaner Trigemini-Rhizotomien laut den Autoren bereits deutlich zunimmt, da immer häufiger Neuronavigationsmethoden während des interventionellen Eingriffs angewandt werden (3).

Das Novum dieser Studie ist, dass die Darstellbarkeit der verknöcherten Ligg. pterygoalare et pterygospinale direkt mit den dreidimensionalen Präparaten korreliert werden konnte. Die Analyse der vorliegenden CT-Datensätze der Schädel bestätigte, dass vollständige Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale mittels CT sicher darstellbar sind. Zur besseren Visualisierung wurden für Schädel mit vollständiger Verknöcherung der Ligg. pterygoalare et pterygospinale multiplanare Rekonstruktionen in Längsachse des Foramen ovale erstellt. Auf diesen Rekonstruktionen können die verknöcherten Bänder besonders gut und in voller Ausdehnung dargestellt werden.

Wie Matys et al. (3) und die aktuelle Studie zeigen, stellt die CT-Bildgebung zur Detektion von Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale eine sichere, routinemäßig im klinischen Setting gut durchführbare Untersuchungsmethode dar. Mögliche Probleme bei der Kanülierung des Foramen ovale aufgrund anatomischer Hindernisse können somit präinterventionell erkannt und beim Eingriff berücksichtigt werden. Bei Neuralgien des N. mandibularis oder eines seiner Äste kann bei ungeklärter Ätiologie und therapierefraktärem Verlauf mittels dieser radiologischen Methoden eine Verknöcherung des Lig. pterygoalare oder des Lig. pterygospinale als Ursache ausgeschlossen werden.

4.2 Kritische Reflexion und Einschränkungen

Im Vergleich zu vielen vorherigen Studien (5, 6, 13, 22, 23, 33, 44, 47-49) betreffend die Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale wurde in dieser Studie mit 564

Schädeln bzw. 1128 Seiten eine hohe Fallzahl analysiert. Auch wenn durch Metaanalysen (1, 4) hohe Fallzahlen entstehen, sollten diese kritisch betrachtet werden. Die Ermittlung der Häufigkeiten der verknöcherten Bänder wurde in den einzelnen Studien unterschiedlich – entweder auf Individuen (Schädel) oder Seiten – angegeben, was einen direkten Vergleich erschwert.

Nach ausführlicher Literaturrecherche wurde keine vergleichbare Studie gefunden, die sowohl adulte als auch kindliche und juvenile Schädel makroskopisch und mittels CT auf das Vorkommen der Verknöcherungen untersucht. Der in dieser Studie durchgeführte Altersvergleich bietet somit einen Neuwert im Vergleich zu früheren Publikationen und kann Hinweise auf die mögliche Ätiologie dieser Verknöcherungen liefern.

Im Geschlechtervergleich stellt die unterschiedliche Gruppengröße eine zu erwähnende Limitation der Studie dar. Von 344 der 564 untersuchten Schädel war das Geschlecht bekannt. Davon waren lediglich 80 Schädel weiblich. 264 Schädel waren männlich. Das ungleiche Verhältnis der Geschlechter zueinander sowie die kleine Fallzahl weiblicher Schädel kann sich durchaus auf die ermittelten Häufigkeiten auswirken. Trotzdem konnten bei den Verknöcherungen, abgesehen von einer häufigeren Verknöcherung des Lig. pterygoalare bei weiblichen Schädeln als bei männlichen Schädeln, gleiche Tendenzen verglichen mit anderen Publikationen beobachtet werden.

Es existieren keine Informationen zur medizinischen Vorgeschichte der Studienpopulation. Bezüglich möglicher klinischer Relevanz der Verknöcherungen wären Informationen über mögliche Symptome einer Nervenkompression zu Lebzeiten bei Schädeln mit nachgewiesener Verknöcherung des Lig. pterygoalare oder pterygospinale von Vorteil.

4.3 Ausblick und Anregungen für weiterführende Arbeiten

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit sollten sich zukünftige Studien mit folgenden Aspekten beschäftigen:

Genauere Analysen möglicher Altersunterschiede im Vorkommen der Verknöcherungen wären wünschenswert. Dazu könnte die Altersgruppe <18 Jahre in weitere Subgruppen unterteilt werden, um die Prävalenz bei Neugeborenen und Säuglingen mit der Prävalenz bei Adoleszenten zu vergleichen. Diese Ergebnisse liefern möglicherweise weitere Hinweise, ob diese Verknöcherung genetisch bedingt sind oder sekundär (evtl. schon in frühen Lebensabschnitten) entstehen. Langzeitstudien, in denen dieselben ProbandInnen zu

mehreren Zeitpunkten im Leben untersucht werden, könnten hierbei wertvolle Erkenntnisse liefern, sind jedoch in der Praxis schwer umsetzbar.

Zusätzlich zu mazerierten Schädeln sollten die Verknöcherungen der beiden Bänder, aber auch diese selbst an Nasspräparaten untersucht werden. Dabei könnte die topographische Nähe des N. mandibularis und seiner Äste zu vorhanden Bändern und deren Verknöcherungen analysieren werden. Dies könnte einen Mehrwert für das Verständnis möglicher Symptome einer Nervenkompression am Lebenden bieten.

4.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse belegen, dass die Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale relativ häufig auftretende anatomische Variationen darstellen, die aufgrund ihrer klinischen Relevanz gekannt werden sollten. Aufgrund der aktuellen Datenlage sind Geschlechts- und Seitenunterschiede nur geringfügig vorhanden, sodass bei entsprechender Symptomatik immer an das Vorkommen einer Knöchelbrücke in Nahebeziehung zum Foramen ovale gedacht werden sollte.

Die beobachteten Unterschiede in den altersbezogenen Prävalenzen liefern einen möglichen Hinweis auf die Ätiologie der verknöcherten Bänder. Sowohl die Einordnung als phylogenetisches Überbleibsel, als auch eine mögliche sekundäre Ossifikation im Laufe des Lebens erscheinen wahrscheinlich.

Die CT-Bildgebung hat sich als zuverlässige Methode zur Diagnostik von Verknöcherungen der Ligg. pterygoalare et pterygospinale erwiesen. Vor Eingriffen im Bereich des Foramen ovale oder bei ätiologisch ungeklärten Nervenkompressionssyndromen des N. mandibularis sollten inkomplette und komplette Verknöcherungen mittels CT-Untersuchung nachgewiesen werden können.

Literaturverzeichnis

1. Pękala PA, Henry BM, Pękala JR, Frączek PA, Tattera D, Natsis K, et al. The pterygoalar bar: A meta-analysis of its prevalence, morphology and morphometry. *J Craniomaxillofac Surg.* 2017;45(9):1535-41.
2. Hyrtl J. Über den Porus crotaphitico-buccinatorius beim Menschen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Wien.* 1862;46:111-5.
3. Matys T, Ali T, Zaccagna F, Barone DG, Kirollos RW, Massoud TF. Ossification of the pterygoalar and pterygospinous ligaments: a computed tomography analysis of infratemporal fossa anatomical variants relevant to percutaneous trigeminal rhizotomy. *J Neurosurg.* 2019;132(6):1942-51.
4. Henry BM, Pękala PA, Frączek PA, Pękala JR, Natsis K, Piagkou M, et al. Prevalence, morphology, and morphometry of the pterygospinous bar: a meta-analysis. *Surg Radiol Anat.* 2020;42(5):497-507.
5. Kavitha Kamath B, Vasantha K. Anatomical Study of Pterygospinous and Pterygoalar Bar in Human Skulls with their Phylogeny and Clinical Significance. *J Clin Diagn Res.* 2014;8(9):Ac10-3.
6. Ryu SJ, Park MK, Lee UY, Kwak HH. Incidence of pterygospinous and pterygoalar bridges in dried skulls of Koreans. *Anat Cell Biol.* 2016;49(2):143-50.
7. Grosse U. Über das Foramen pterygospinosum CIVININI und das Foramen crotaphiticobuccinatorium HYRTL. *Anatomischer Anzeiger.* 1893;8:321-48.
8. Standring S. *Gray's Anatomy, the anatomical basis of clinical practice* 42. ed. London: Elsevier 2021.
9. Civinini F. Ligamento pterigospinoso. *Arch sc med-fis Toscane* 1837;1:381.
10. Civinini F. Varieta non comune dell'osso sfenoide umano *Nuovo Giornale de'Letterati di Pisa, tomo XXXI, Letteratura Scienze Morali, e Arti Liberali* 1835;31,1835.
11. Anatomische-Gesellschaft. *TERMINOLOGIA ANATOMICA 2023* of the ANATOMISCHE GESELLSCHAFT, International Anatomical Terminology. In: Anatomische Gesellschaft E, Germany, editor. Erlangen, Germany 2023.
12. Iwanaga J, Clifton W, Dallapiazza RF, Miyamoto Y, Komune N, Gremillion HA, et al. The pterygospinous and pterygoalar ligaments and their relationship to the mandibular

- nerve: Application to a better understanding of various forms of trigeminal neuralgia. *Ann Anat.* 2020;229:151466.
13. Antonopoulou M, Piagou M, Anagnostopoulou S. An anatomical study of the pterygospinous and pterygoalar bars and foramina - their clinical relevance. *J Craniomaxillofac Surg.* 2008;36(2):104-8.
 14. Touska P, Hasso S, Oztek A, Chinaka F, Connor SEJ. Skull base ligamentous mineralisation: evaluation using computed tomography and a review of the clinical relevance. *Insights Imaging.* 2019;10(1):55.
 15. Harikrishnan P. Analysis of Clinical Significance of the Pterygospinous and Pterygoalar Bars. *J Craniofac Surg.* 2020;31(5):e449-e51.
 16. Komune N, Matsuo S, Nakagawa T. The Fascial Layers Attached to the Skull Base: A Cadaveric Study. *World Neurosurg.* 2019;126:e500-e9.
 17. Elnashar A, Patel SK, Kurbanov A, Zvereva K, Keller JT, Grande AW. Comprehensive anatomy of the foramen ovale critical to percutaneous stereotactic radiofrequency rhizotomy: cadaveric study of dry skulls. *J Neurosurg.* 2019;132(5):1414-22.
 18. von Lüdinghausen M, Kageyama I, Miura M, Alkhatib M. Morphological peculiarities of the deep infratemporal fossa in advanced age. *Surg Radiol Anat.* 2006;28(3):284-92.
 19. Cho KH, Yamamoto M, Murakami G, Rodríguez-Vázquez JF. Letter to the Editor: "Pterygospinous and pterygoalar bars in children". *Surg Radiol Anat.* 2022;44(5):809-11.
 20. Nayak SR, Saralaya V, Prabhu LV, Pai MM, Vadgaonkar R, D'Costa S. Pterygospinous bar and foramina in Indian skulls: incidence and phylogenetic significance. *Surg Radiol Anat.* 2007;29(1):5-7.
 21. Piagkou M, Fiska A, Tsakotos G, Triantafyllou G, Politis C, Koutserimpas C, et al. A morphological study on the sphenoid bone ligaments' ossification pattern. *Surg Radiol Anat.* 2023;45(11):1405-17.
 22. Saran RS, Ananthi KS, Subramaniam A, Balaji MT, Vinaitha D, Vaithianathan G. Foramen of civinini: a new anatomical guide for maxillofacial surgeons. *J Clin Diagn Res.* 2013;7(7):1271-5.
 23. Goyal N, Jain A. An anatomical study of the pterygospinous bar and foramen of Civinini. *Surg Radiol Anat.* 2016;38(8):931-6.
 24. Esen K, Özgür A, Balcı Y, Ten B. Pterygospinous and pterygoalar bars in children. *Surg Radiol Anat.* 2022;44(3):353-9.

25. Chouke KS. On the incidence of the foramen of Civinini and the porus crotaphiticobuccinatorius in American whites and Negroes; observations on 1544 skulls. *Am J Phys Anthropol.* 1946;4(2):203-26.
26. Andernhuber F, Pera F, Streicher J. *Waldeyer - Anatomie des Menschen* 19 ed. Berlin / Boston Walter de Gruyter 2012.
27. Aumüller G. *Duale Reihe Anatomie* 5. ed. Stuttgart Georg Thieme Verlag; 2020.
28. Trepel M. *Neuroanatomie - Struktur und Funktion* 7. ed. München Elsevier 2017.
29. Hafferl A. *Lehrbuch der topographischen Anatomie* 3ed. Thiel W, editor. Berlin / Heidelberg / New York Springer Verlag 1969.
30. Pretterklieber ML, Skopakoff C, Mayr R. The human maxillary artery reinvestigated: I. Topographical relations in the infratemporal fossa. *Acta Anat (Basel).* 1991;142(4):281-7.
31. Pretterklieber M, Pretterklieber B. *Pflichttrack Eingeweide und Leitungsbahnen Handbuch - Auflage 2024.* 2024
32. Khalifa HM, Barayan MA. Ossification of Pterygospinous Ligament: An Incidental Finding in Cone Beam Computed Tomography. *Am J Case Rep.* 2021;22:e928061.
33. Natsis K, Piagkou M, Skotsimara G, Totlis T, Apostolidis S, Panagiotopoulos NA, et al. The ossified pterygoalar ligament: an anatomical study with pathological and surgical implications. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014;42(5):e266-70.
34. Masuhr KF, Masuhr F, Neumann M. *Duale Reihe Neurologie* 7. ed. Stuttgart Thieme 2013.
35. Rosa RR, Faig-Leite H, Faig-Leite FS, Moraes LC, Moraes ME, Filho EM. Radiographic study of ossification of the pterygospinous and pterygoalar ligaments by the Hirtz axial technique. *Acta Odontol Latinoam.* 2010;23(1):63-7.
36. Radoš I. TREATMENT OPTIONS FOR TRIGEMINAL NEURALGIA. *Acta Clin Croat.* 2022;61(Suppl 2):96-102.
37. Nayak SB, Kumar N. Lingual Nerve Entrapment in Fused Submandibular and Sublingual Salivary Glands: A Unique Finding. *J Craniofac Surg.* 2018;29(7):e677-e9.
38. Peuker ET, Fischer G, Filler TJ. Entrapment of the lingual nerve due to an ossified pterygospinous ligament. *Clin Anat.* 2001;14(4):282-4.
39. Piagkou M, Demesticha T, Piagkos G, Georgios A, Panagiotis S. Lingual nerve entrapment in muscular and osseous structures. *Int J Oral Sci.* 2010;2(4):181-9.

40. Piagkou M, Demesticha T, Skandalakis P, Johnson EO. Functional anatomy of the mandibular nerve: consequences of nerve injury and entrapment. *Clin Anat.* 2011;24(2):143-50.
41. Piagkou MN, Demesticha T, Piagkos G, Androutsos G, Skandalakis P. Mandibular nerve entrapment in the infratemporal fossa. *Surg Radiol Anat.* 2011;33(4):291-9.
42. Tubbs RS, May WR, Jr., Apaydin N, Shoja MM, Shokouhi G, Loukas M, et al. Ossification of ligaments near the foramen ovale: an anatomic study with potential clinical significance regarding transcutaneous approaches to the skull base. *Neurosurgery.* 2009;65(6 Suppl):60-4; discussion 4.
43. Khairnar KB, Bhusari PA. An anatomical study on the foramen ovale and the foramen spinosum. *J Clin Diagn Res.* 2013;7(3):427-9.
44. Daimi SR, Siddiqui AU, Gill SS. Analysis of foramen ovale with special emphasis on pterygoalar bar and pterygoalar foramen. *Folia Morphol (Warsz).* 2011;70(3):149-53.
45. Šink Ž, Umek N, Alibegović A, Cvetko E. Sphenoidal Foramen Ovale in the Slovenian Population: An Anatomical Evaluation with Clinical Correlations. *Diagnostics (Basel).* 2023;13(5).
46. Dauber W. *Feneis' Bild-Lexikon der Anatomie* 10. ed. Stuttgart, New York Georg Thieme Verlag 2008.
47. Krmpotić-Nemanić J, Vinter I, Hat J, Jalsovec D. Mandibular neuralgia due to anatomical variations *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 1999;256:205-8.
48. Das S, Paul S. Ossified pterygospinous ligament and its clinical implications. *Bratisl Lek Listy.* 2007;108(3):141-3.
49. Skrzat J, Walocha J, Srodek R. An anatomical study of the pterygoalar bar and the pterygoalar foramen. *Folia Morphol (Warsz).* 2005;64(2):92-6.

Zur sprachlichen Optimierung des Textes wurde folgendes Tool verwendet:

Name und Version des Tools: ChatGPT-4-turbo

Anbieter: OpenAI

Datum der Generierung der Inhalte: 24. Februar 2025

Adresse: <https://openai.com/chatgpt>