

Aus dem Institut für Anatomie
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Variationsbiologische Untersuchungen am Os coxae

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Medizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Svenja Fischer
aus Koblenz

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. P. Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 12. Juni 2026

Nachnutzungslizenz: CC BY 4.0

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Ebner S, Schmeisser MJ, Schumann S (2025) Exostoses in the Obturator Foramen – an Osteological Study. *Folia Morphologica*. DOI: 10.5603/fm.103263

Für meine Weiterentwicklung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1. Einleitung	1
1.1. Allgemeine Grundlagen der Knochenentwicklung	1
1.2. Morphologie des knöchernen Beckens	2
2. Ziel der Dissertation.....	6
3. Material und Methoden	7
3.1. Untersuchungsmaterial.....	7
3.2. Untersuchung der Präparate	7
4. Ergebnisse	11
4.1. Ossa coxae	11
4.2. Exostosen im Foramen obturatum	12
4.3. Ossifizierte Bandstrukturen	16
5. Diskussion	19
5.1. Exostosen im Foramen obturatum	19
5.2. Ossifizierte Bandstrukturen.....	22
6. Zusammenfassung	28
7. Literaturverzeichnis	29
9. Danksagung.....	35
10. Tabellarischer Lebenslauf.....	36

I. Abkürzungsverzeichnis

3D-CT	dreidimensionale Computertomografie
A.	Arteria
Abb.	Abbildung
bds.	beidseits
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
et al.	et alii / et aliae / et alia
FO	Foramen obturatum
ISG	Iliosakralgelenk
Lat.	lateral
Lig.	Ligamentum
LSS	Ligamentum sacrospinale
LST	Ligamentum sacrotuberale
LTA	Ligamentum transversum acetabuli
M.	Musculus
Med.	medial
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomografie
n	Anzahl
Nr.	Nummer
NSAR	Nichtsteroidale Antirheumatika
N.	Nervus
p-Wert	Wahrscheinlichkeitswert
PNE	Pudendusnervenkompressionssyndrom
s.	siehe
Tab.	Tabelle
TEP	Totalendoprothese
TNF- α	Tumornekrosefaktor alpha
v. a.	vor allem
z. B.	zum Beispiel

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primäre Ossifikationszentren und Knochenfugen des Os coxae.....	3
Abbildung 2: Rechtes Hüftbein, Ansicht von lateral.....	5
Abbildung 3: Geschlechtermerkmale anhand der Incisura ischiadica major	8
Abbildung 4: Geschlechtermerkmale anhand des subpubischen Winkels.....	9
Abbildung 5: Anzahl und Verteilung der Beckenhälften.....	11
Abbildung 6: Klassifikation der Exostosen im Foramen obturatum.....	14
Abbildung 7: Detailaufnahmen von Exostosen im Foramen obturatum.....	14
Abbildung 8: Lokalisation der Exostosen im Foramen obturatum	15
Abbildung 9: Ossifizierte bzw. teilossifizierte Ligamenta transversa acetabuli (LTA).....	18
Abbildung 10: Ossifikationen des Ligamentum sacrotuberale (LST) und Ligamentum sacrospinale (LSS).....	18

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fälle von Exostosen im Foramen obturatum.....	13
Tabelle 2: Länge von ossifizierten Bändern am Becken.....	17
Tabelle 3: Brooker-Klassifikation heterotoper Ossifikationen im Hüftbereich.....	23
Tabelle 4: Vergleich publizierter Fallberichte und Studien zu ligamentären Ossifikationen im Beckenbereich.....	27

1. Einleitung

Knochen bildet gemeinsam mit Knorpel, Bändern und Gelenken den passiven Bewegungsapparat (Felsenthal und Zelzer 2017). Der passive Bewegungsapparat schafft in Verbindung mit dem aktiven Bewegungsapparat (Skelettmuskeln und ihre Hilfsstrukturen) die Grundlage für Bewegungen. Knochengewebe zeichnet sich durch eine hohe Zug-, Druck-, Torsions- und Biegefestigkeit aus (Røhl 1991). Darüber hinaus bildet das Skelett eine stabile Hülle für Organe und das zentrale Nervensystem.

1.1. Allgemeine Grundlagen der Knochenentwicklung

Die Entwicklung der Extremitäten beginnt am Ende der 4. Embryonalwoche mit der Ausstülpung der Extremitätenknospen aus der ventrolateralen Rumpfwand. Die Knospen der unteren Extremitäten entstehen wenige Tage nach denen der oberen. Die Extremitätenknospen bestehen aus mesodermalem Gewebe, das von Ektoderm überzogen ist (Gardner *et al.* 1975; Standring 2020). Ab der 6. Entwicklungswoche beginnt die Differenzierung der Extremitätenanlage, wobei die Knochen überwiegend durch chondrale Ossifikation entstehen (Graumann und Sasse 2004).

Bei diesem Prozess differenzieren Mesenchymzellen zunächst zu Chondroblasten und bilden so das Primordialskelett in Form eines Knorpelmodells. Anschließend beginnt die chondrale Ossifikation: Zunächst entsteht eine perichondrale Knochenmanschette durch direkte Ossifikation aus Mesenchymzellen. Danach setzt die enchondrale Ossifikation ein: Gefäßsprossen dringen in das Knorpelmodell ein, Makrophagen und Osteoblasten wandern ein, und primäre Ossifikationszentren entstehen. Postnatal entwickeln sich sekundäre Ossifikationszentren in den Epiphysen. In den Epiphysenfugen findet während des Wachstums kontinuierlich enchondrale Ossifikation statt, bis diese im Jugend- bis jungen Erwachsenenalter vollständig verknöchern (Walker 1981; Standring 2020).

Auch nach Abschluss des Wachstums bleibt der Knochen ein dynamisches Gewebe. Während im Kindes- und Jugendalter durch Modeling Form und Größe des Knochens angepasst werden, dominiert im Erwachsenenalter das Remodeling – ein kontinuierlicher, gekoppelt gesteuerter Knochenumbauprozess, der alten oder beschädigten Knochen ersetzt (Seeman und Delmas 2009; Maciel 2023). Durch diesen Prozess wird das menschliche Skelett im Verlauf von etwa zehn Jahren vollständig erneuert (Langdahl *et al.* 2016). Remodeling wird durch das Zusammenspiel von Osteoklasten und Osteoblasten gesteuert und von mechanischer Belastung, hormonellen Einflüssen und interzellulären Signalwegen reguliert (Kim *et al.* 2020; Bolamperti *et al.* 2022). Kommt es zu einer Störung dieser Balance, können

pathologische Veränderungen wie Osteoporose oder heterotope Ossifikationen entstehen (Manolagas 2010; Office of the Surgeon General 2004).

1.2. Morphologie des knöchernen Beckens

1.2.1. Embryologie des Os coxae

Das knöcherne Becken besteht aus drei Knochen: dem Kreuzbein (Os sacrum), dem Steißbein (Os coccygis) und den beiden Hüftbeinen (Ossa coxae), die den größten Anteil bilden. Jedes Hüftbein setzt sich aus drei zunächst eigenständigen Knochen zusammen, die im Verlauf der Entwicklung miteinander verschmelzen. Jeder dieser Knochen entsteht aus einem eigenen primären Ossifikationszentrum.

Im Knorpelmodell zeigt sich zwischen der 8. und 9. Schwangerschaftswoche zunächst das primäre Ossifikationszentrum des Darmbeins (Os ilium), gelegen im Dach des Acetabulums (Laurenson 1964). Als nächstes erscheint zwischen dem 4. und 5. Schwangerschaftsmonat das primäre Ossifikationszentrum des Sitzbeins (Os ischii) dorsokaudal des Acetabulums. Zwischen dem 5. und 6. Schwangerschaftsmonat entsteht schließlich das Ossifikationszentrum des Schambeins (Os pubis) im Ramus superior. Damit sind bei Geburt alle drei primären Ossifikationszentren entwickelt und identifizierbar (Scheuer und Black 2004). Die Lokalisation der primären Ossifikationszentren sowie die Y-förmige Epiphysenfuge sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Postnatal bilden sich im Laufe der ersten Lebensjahrzehnte sekundäre Ossifikationszentren. Alle drei Knochen besitzen ein sekundäres Ossifikationszentrum im Acetabulum. Weitere finden sich an der Crista iliaca, am Ramus ossis ischii, am Tuber ischiadicum sowie am Pecten, Corpus und Ramus ossis pubis. Zusätzlich können variable Ossifikationszentren, etwa in der Spina iliaca anterior inferior oder an der Spina ischiadica, auftreten (Scheuer und Black 2004).

Im Acetabulum stoßen die drei Knochen über eine Y-förmige Epiphysenfuge zusammen, die zwischen dem 14. und 16. Lebensjahr verknöchert (Parvaresh 2018). Die vollständige Ossifikation des Hüftbeins ist in der Regel erst im 4. Lebensjahrzehnt abgeschlossen.

Die Entwicklung des Beckens verläuft über eine komplexe Abfolge von Knorpelbildung sowie aufeinanderfolgenden Verknöcherungsvorgängen aus primären und sekundären Zentren. Im Unterschied zu den klassischen Röhrenknochen ist dieser Prozess zeitlich und morphologisch differenzierter und kann interindividuell variieren. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass

auch die fetale Bewegungsaktivität einen maßgeblichen Einfluss auf die normale Beckenentwicklung ausübt (Nowlan 2015; Verbruggen 2017).

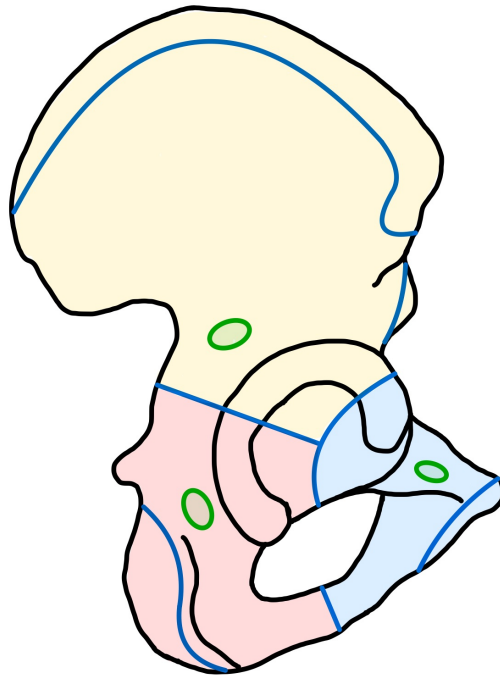


Abbildung 1: Primäre Ossifikationszentren und Epiphysenfugen des Os coxae

Die Grafik zeigt schematisch ein rechtes Os coxa, betrachtet von lateral. Die drei Knochen, aus denen das Hüftbein besteht, sind farbig hinterlegt: Gelb=Os ilium, rot=Os ischii, blau=Os pubis. Die grünen Kreise stellen die jeweiligen primären Ossifikationszentren dar. Die blauen Linien verdeutlichen die Epiphysenfugen des Hüftbeins.

1.2.2. Anatomie des Os coxae

Nach Abschluss der Entwicklung bildet sich aus den drei Knochenanteilen Darmbein, Sitzbein und Schambein das Os coxae. Um die weiteren Untersuchungen einordnen zu können, soll im Folgenden die Anatomie des Os coxae näher beschrieben werden. Einen Überblick über die laterale Ansicht des rechten Hüftbeins mit seinen wichtigsten Strukturen gibt Abbildung 2.

1.2.2.1. Os ilium

Das Os ilium besteht aus der Darmbeinschaukel (Ala ossis ilii) und dem kaudalen Darmbeinkörper (Corpus ossis ilii). Beide Anteile sind durch die Linea arcuata voneinander abzugrenzen. Die konkave Beckenschaukel weist medial die Fossa iliaca und lateral die Facies glutea auf. Kranial wird sie durch die Crista iliaca begrenzt. Ventral folgen die Spinae iliacae anteriores superior et inferior, dorsal die Spinae iliacae posteriores superior et inferior. Unterhalb der Spina iliaca posterior inferior befindet sich die Incisura ischiadica major. Medial grenzt das Os ilium an das Os sacrum mit der Tuberositas iliaca und der Facies auricularis als

Gelenkfläche des Iliosakralgelenks (Standring 2020). Das Corpus ossis ilii beteiligt sich zudem am kranialen Anteil des Acetabulums.

1.2.2.2. Os ischii

Das Os ischii bildet als dorsokaudaler Knochen den hinteren Teil des Acetabulums. Es besteht aus einem Corpus, das in den Ramus ossis ischii übergeht. Am Corpus liegt dorsal die Spina ischiadica, unterhalb die Incisura ischiadica minor. Kaudal folgt das Tuber ischiadicum. Der Ramus ossis ischii zieht strangförmig nach ventrocranial und trifft auf das Os pubis.

1.2.2.3. Os pubis

Das Os pubis liegt ventral und beteiligt sich am vorderen Anteil des Acetabulums. Es besteht aus Corpus, Ramus superior und Ramus inferior. Über die Facies symphysialis steht es mit der Gegenseite in Kontakt. Der Ramus superior zieht zum Acetabulum, der Ramus inferior trifft auf den Ramus ossis ischii.

1.2.2.4. Acetabulum

Das Acetabulum wird von allen drei Hüftbeinknochen gebildet. Es nimmt den Femurkopf auf und bildet mit diesem das Hüftgelenk. Der Limbus acetabuli begrenzt die Pfanne, die kaudal durch die Incisura acetabuli unterbrochen wird, welche von Gefäßen passiert und durch das Ligamentum transversum acetabuli überbrückt wird. Die Gelenkfläche, die Facies lunata acetabuli, ist hufeisenförmig angeordnet und umschließt die tiefer gelegene Fossa acetabuli (Standring 2020)

1.2.2.5. Bandstrukturen

Das Ligamentum transversum acetabuli, das Ligamentum sacrotuberale und das Ligamentum sacrospinale sind zentrale Bandstrukturen des Beckens. Das Ligamentum transversum acetabuli verläuft über die Incisura acetabuli und stabilisiert zusammen mit dem Labrum acetabulare das Hüftgelenk. Es kann alters- und degenerationsbedingt teilweise verknöchern (Nomani *et al.* 2023). Das Ligamentum sacrotuberale verbindet das Kreuzbein mit dem Tuber ischiadicum und überträgt Kräfte zwischen Rumpf und unteren Extremitäten. Das Ligamentum sacrospinale trennt Foramen ischiadicum majus und minus und trägt ebenfalls wesentlich zur Stabilität bei.

1.2.2.6. Foramen obturatum

Zwischen Os pubis und Os ischii bleibt das Foramen obturatum bestehen, das durch die Membrana obturatoria verschlossen wird. Cranial bildet die Membran zusammen mit dem Sulcus obturatorius den Canalis obturatorius, durch den Arteria und Vena obturatoria, sowie der Nervus obturatorius verlaufen. Zusätzlich dient der Foramenrand mit der Membran als

Ansatz für M. obturatorius internus und externus sowie das Lig. pubofemorale, die zur Stabilität und Beweglichkeit des Hüftgelenks beitragen (Standing 2020).

Die Membrana obturatoria inseriert am Tuberculum obturatorium anterius und posterius (Jo *et al.* 2016; Šaherl und Rakuša 2022), die variabel ausgebildet sein können (Standing 2020).

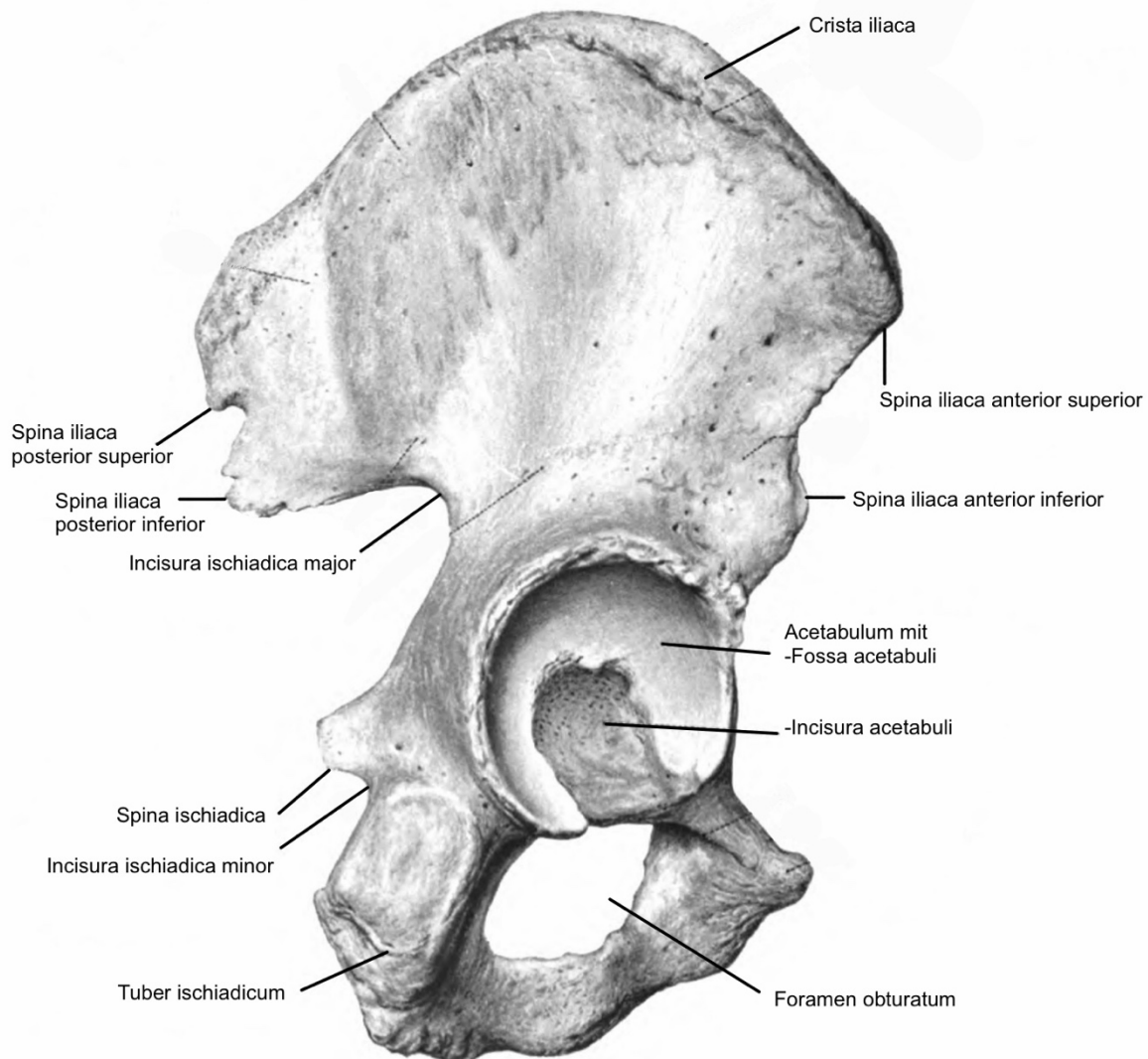


Abbildung 2: Rechtes Hüftbein, Ansicht von lateral

Dargestellt ist ein rechtes Os coxae in lateraler Ansicht mit Beschriftung der anatomischen Strukturen.

Verändert nach: „Atlas and Textbook of Human Anatomy“, 1909, Vol. 1, Fig. 132, von Johannes Sobotta

2. Ziel der Dissertation

Eine genaue Kenntnis der menschlichen Anatomie und ihrer Variabilität ist für die diagnostische und therapeutische Medizin von großer Bedeutung. Es existieren zahlreiche Veröffentlichungen zu anatomischen Varianten des menschlichen Skeletts. Viele Studien beruhen auf osteologischen Trockenpräparaten, während neuere Arbeiten durch bildgebende Verfahren auch *in vivo* durchgeführt wurden, wobei die Ergebnisse hinsichtlich Häufigkeit und Ausprägung anatomischer Varianten jedoch eine erhebliche Heterogenität aufweisen. Die Untersuchung an Knochenpräparaten bietet dabei den Vorteil, unabhängig von den möglichen Limitationen radiologischer Verfahren zu sein.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Hüftbein mit besonderem Fokus auf knöcherne Varianten im Bereich des Foramen obturatum sowie auf ossifizierte Bandstrukturen (Ligamentum transversum acetabuli, Ligamentum sacrotuberale, Ligamentum sacrospinale) systematisch zu untersuchen. Erhobene Befunde sollen in ihrer Häufigkeit und Morphologie dokumentiert und mit dem aktuellen Stand der Literatur verglichen werden.

3. Material und Methoden

3.1. Untersuchungsmaterial

Die für diese Arbeit untersuchten humanen Knochenpräparate stammen aus der anatomischen Sammlung des Instituts für Anatomie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Alle Präparate sind anonymisiert eingelagert, sodass keine Informationen zu Alter, Geschlecht oder medizinischer Vorgeschichte zu den Körperspenden vorliegen.

In die Analyse einbezogen wurden ausschließlich Hüftbeine und vollständige Beckenpräparate. Insgesamt konnten 221 Ossa coxae (davon 18 vollständige Becken und 185 einzelne Hüftbeine) in die Untersuchung aufgenommen werden. Artikulierte Präparate wurden berücksichtigt, während grob beschädigte oder unvollständige Knochen ausgeschlossen wurden, um mögliche Fehlinterpretationen morphologischer Varianten zu vermeiden.

3.2. Untersuchung der Präparate

3.2.1. Geschlechtsspezifische Klassifizierung

Da das Becken geschlechterspezifische Merkmale aufweist, wurden die Ossa coxae soweit möglich entweder dem männlichen oder weiblichen Geschlecht zugeordnet. Nach Grupe *et al.* (2015) können verschiedene morphologische Kriterien herangezogen werden. Zunächst wurde die Incisura ischiadica major von medial betrachtet und ihre Morphologie untersucht: Beim männlichen Becken ist die Kerbe eng und spitz mit dem tiefsten Punkt weiter kranial gelegen, während sie im weiblichen Becken weit und auslaufend ist, mit dem tiefsten Punkt weiter kaudal (Abb. 3).

Zusätzlich wurde der Bogen betrachtet, der durch die Incisura ischiadica major und die Facies auricularis gebildet wird: Im männlichen Becken ist dieser Bogen typischerweise durchgehend, während er im weiblichen Becken eine Stufe zwischen beiden Strukturen (*Arc composé*) aufweist (Abb. 3).

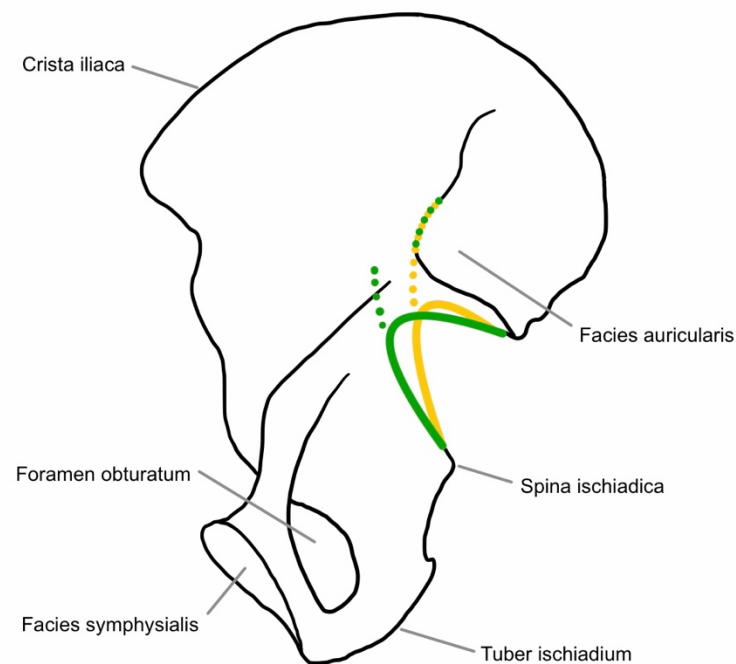


Abbildung 3: Geschlechterdifferenzierung anhand der Incisura ischiadica major

Die Grafik zeigt schematisch ein rechtes Os coxae, betrachtet von medial. Die durchgezogenen Linien zeigen den typischen Verlauf der Incisura ischiadica major des jeweiligen Geschlechts (Mann = gelb, Frau = grün). Die gepunktete Linie stellt den Bogen dar, der durch die Incisura ischiadica major und der Facies auricularis gebildet wird. Beim Mann (gelb) ist dieser Bogen durchgehend, wohingegen er bei der Frau (grün) einen Sprung aufweist.

Ein weiteres Kriterium stellte das Verhältnis des Pecten ossis pubis zum Acetabulum dar: Beim Mann endet der Schambeinkamm kaudaler am Acetabulum als bei der Frau. Zudem ist das Acetabulum beim Mann weiter lateral gelegen.

Auch der subpubische Winkel diente als Merkmal: Beim männlichen Becken verläuft der untere Schambeinast steil abwärts und bildet mit der Gegenseite eine V-Form, während er beim weiblichen Becken eine U-Form ausbildet (Abb. 4).

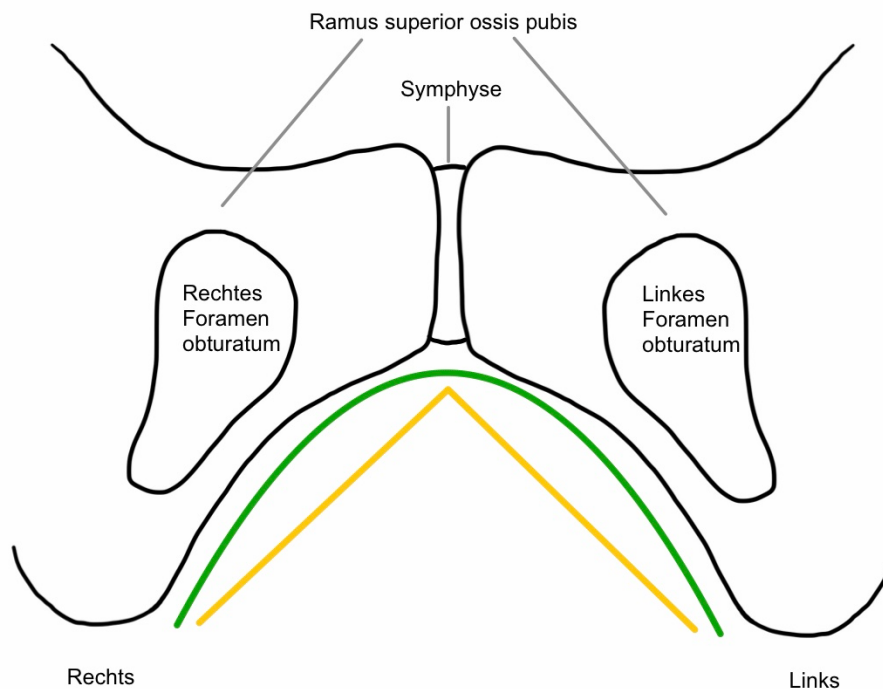


Abbildung 4: Geschlechterdifferenzierung anhand des subpubischen Winkels

Die Grafik zeigt schematisch die Symphyse eines Beckens, betrachtet von ventral. Die bunten Linien zeigen den typischen Verlauf des subpubischen Winkels des jeweiligen Geschlechts (Mann = gelb, Frau = grün), der zur Geschlechteridentifizierung dienen kann.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Form des Foramen obturatum: Beim männlichen Becken ist es eher oval, während es beim weiblichen Becken eine dreieckige Form aufweist. Die Ossa coxae wurden entsprechend der genannten Kriterien kategorisiert. Knochen, bei denen eine eindeutige geschlechtsspezifische Zuordnung nicht möglich war, wurden als „indifferent“ gekennzeichnet.

3.2.2. Altersschätzung

Zur Altersschätzung wurden die Symphysis pubica und die Facies auricularis des Os ilium makroskopisch auf ihre altersabhängigen Merkmale hin untersucht. Bei der Symphyse wurden Oberflächenrelief, Randstruktur und Degenerationsphasen anhand der etablierten Suchey-Brooks-Methode beurteilt (Brooks und Suchey 1990). Die Facies auricularis des Os ilium wurde hinsichtlich ihrer Oberflächenstruktur, Porosität und Konturlinien ausgewertet – Kriterien, die insbesondere in forensischen Altersbestimmungen Anwendung finden (Buckberry und Chamberlain 2002).

Ein Präzisionsmessschieber der Firma Blankenhorn wurde für Messungen verwendet. Die statistische Auswertung erfolgte mittels Fisher-Exact-Test; ein p-Wert von $\leq 0,05$ wurde als statistisch signifikant definiert.

4. Ergebnisse

4.1. Ossa coxae

Nach Betrachtung der Knochen konnten von den insgesamt 221 Beckenhälften 103 der linken und 118 der rechten Körperhälfte zugeordnet werden.

Anhand der oben genannten geschlechtsspezifischen Merkmale wurden die Knochen kategorisiert. Knochen, die Merkmale beider Geschlechter besaßen oder keine eindeutige Zuordnung erlaubten, wurden als indifferent bezeichnet.

Insgesamt ergaben sich 57 linke und 61 rechte weibliche Beckenhälften, 38 linke und 50 rechte männliche Beckenhälften sowie 8 linke und 7 rechte indifferente Beckenhälften. Die Verteilung lässt sich aus Abbildung 5 entnehmen.

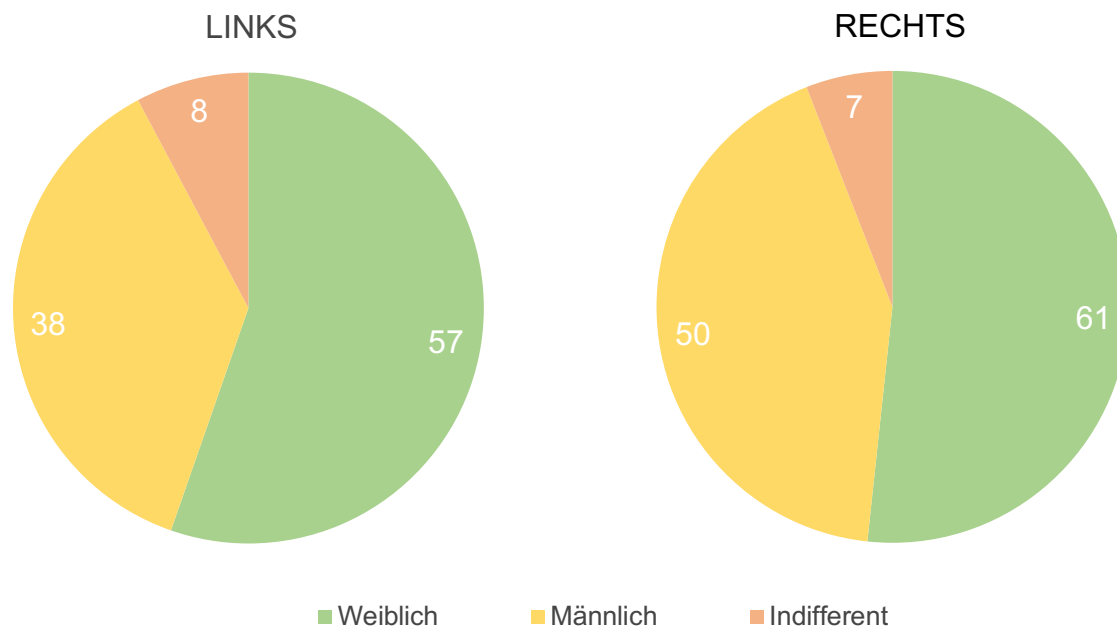


Abbildung 5: Anzahl und Verteilung der Beckenhälften

In dieser Grafik wird die Anzahl aller Beckenpräparate im Seitenvergleich (linke und rechte Körperhälfte) aufgeführt. Diese wurden weiterhin unterteilt, welchem Geschlecht sie zugeordnet wurden: Weiblich = grün, männlich = gelb. Konnte ein Präparat nicht sicher einem der beiden Geschlechter zugeordnet werden, wurde es als indifferent (= orange) kategorisiert.

Alle untersuchten Ossa coxae wurden zusätzlich einer Altersschätzung unterzogen. Anhand der morphologischen Veränderungen der Symphysis pubica sowie der Facies auricularis des Os ilium konnten sämtliche Präparate den etablierten Kriterien nach Brooks und Suchey (1990) sowie Schmitt (2004) zugeordnet werden. In allen Fällen ergab sich dabei ein Alter von über 60 Jahren, sodass die gesamte Stichprobe der anthropologischen Altersgruppe „senilis“ entspricht.

4.2. Exostosen im Foramen obturatum

Exostosen im Foramen obturatum wurden in insgesamt 21 von 221 Hüftknochen (9,5 %) nachgewiesen. Die rechte Beckenhälfte war häufiger betroffen als die linke (14 Fälle [11,9 %] versus 7 Fälle [6,8 %]). Mithilfe des Fisher-Exact-Tests konnte jedoch kein signifikanter Zusammenhang zwischen der betroffenen Seite und dem Auftreten von Exostosen festgestellt werden.

Auch zwischen den Geschlechtern zeigte sich kein relevanter Unterschied (männlich: n=10; weiblich: n=8; indifferent: n=3) (Tabelle 1).

Aufgrund der morphologischen Unterschiede im Erscheinungsbild wurden die Exostosen in drei Typen eingeteilt (Abb. 6). Typ A beschreibt flache, wellenförmige Strukturen (n=11; 52,4 %), Typ B spitz zulaufende, fingerartige Fortsätze (n=8; 38,1 %) und Typ C komplex geformte, bizarr erscheinende Exostosen (n=2; 9,5 %). Da Exostosen des Typs C in unmittelbarer Nähe des Sulcus obturatorius ein erhöhtes Risiko für die Kompression des neurovaskulären Bündels im Canalis obturatorius bergen, wurde eine Unterteilung in die Subtypen C1 (nahe des Sulcus obturatorius) und C2 (entfernt davon) vorgenommen.

Typische Beispiele der unterschiedlichen Exostosetypen sind in Abbildung 7 dargestellt.

Die meisten Exostosen (n=11) befanden sich am medialen Rand des Foramen obturatum. In 11 Präparaten traten multiple Exostosen auf, die jeweils den Typen A oder B zugeordnet werden konnten (Abb. 8).

In einem Präparat (Nr. 2) wurde zusätzlich eine teilweise Ossifikation des Ligamentum transversum acetabuli mit einer Länge von 12,9 mm festgestellt. Weitere anatomische Varianten der Ossa coxae traten nicht auf (Tab. 1).

Ergebnisse

Präparat Nr.	Seite	Geschlecht	Typ der dominanten Exostose	Länge der dominanten Exostose in mm	Anzahl und Typ der zusätzlichen Exostosen	Zusätzliche Variationen
1	Rechts	Männlich	B	8,34	3 (B, A, A)	
2	Rechts	Männlich	B	8,02	2 (B, B)	Teilweise ossifiziertes LTA (12,91 mm)
3	Rechts	Männlich	B	4,83		
4	Rechts	Männlich	B	3,94	1 (B)	
5	Rechts	Männlich	A	3,71		
6	Rechts	Männlich	A	2,15		
7	Rechts	Weiblich	A	6,24		
8	Rechts	Weiblich	B	6,21	1 (A)	
9	Rechts	Weiblich	B	6,04		
10	Rechts	Weiblich	B	4,51		
11	Rechts	Weiblich	A	2,17		
12	Rechts	Weiblich	A	2,15		
13	Rechts	Indifferent	C1	15,18	2 (B, A)	
14	Rechts	Indifferent	A	4,88	1 (A)	
15	Links	Männlich	C1	13,83	2 (B, A)	
16	Links	Männlich	A	2,13	1 (A)	
17	Links	Männlich	B	1,95	1 (B)	
18	Links	Männlich	A	1,65		
19	Links	Weiblich	A	2,21		
20	Links	Weiblich	A	1,93	1 (A)	
21	Links	Indifferent	A	4,0	2 (A, A)	

Tabelle 1: Fälle von Exostosen im Foramen obturatum

Gezeigt sind die Befunde von insgesamt 21 Präparaten mit Exostosen im Foramen obturatum. Angegeben sind Präparatnummer, Seite, Geschlecht, Typ der dominanten Exostose, Länge der dominanten Exostose in Millimetern, Anzahl und Typ zusätzlicher Exostosen sowie weitere Variationen (z. B. ossifizierte Bandstrukturen). Die Klassifikation der Exostosen erfolgte in drei Typen: Typ A (flach, wellenförmig), Typ B (spitz, fingerartig) und Typ C (komplex, bizarr geformt) mit Subtypen C1 (nahe des Sulcus obturatorius) und C2 (entfernt vom Sulcus obturatorius).

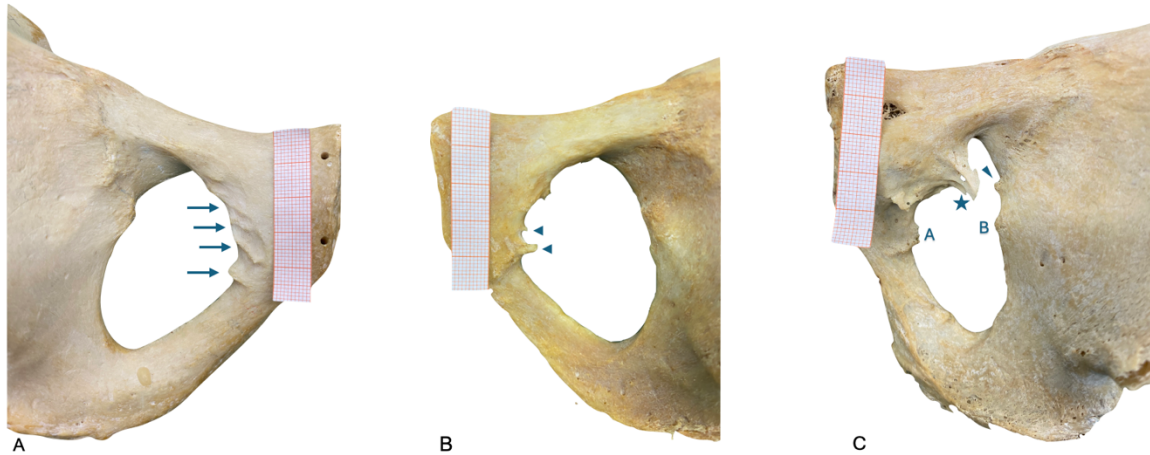


Abbildung 6: Klassifikation der Exostosen im Foramen obturatum.

A: Flache, wellenartige Formationen wurden als Typ A klassifiziert (Präparat Nr. 21, hintere Ansicht des linken Os coxae).

B: Spitz zulaufende, fingerartige Projektionen wurden als Typ B klassifiziert (Präparat Nr. 8, hintere Ansicht des rechten Os coxae mit zusätzlicher Exostose vom Typ A).

C: Bizarre, komplex geformte Exostosen wurden als Typ C klassifiziert (Präparat Nr. 13, hintere Ansicht des rechten Os coxae mit zusätzlichen Exostosen vom Typ B und A sowie einem deutlich sichtbaren posterioren Obturatortuberkel (Pfeilspitze)).

Maßstab = 1 cm.

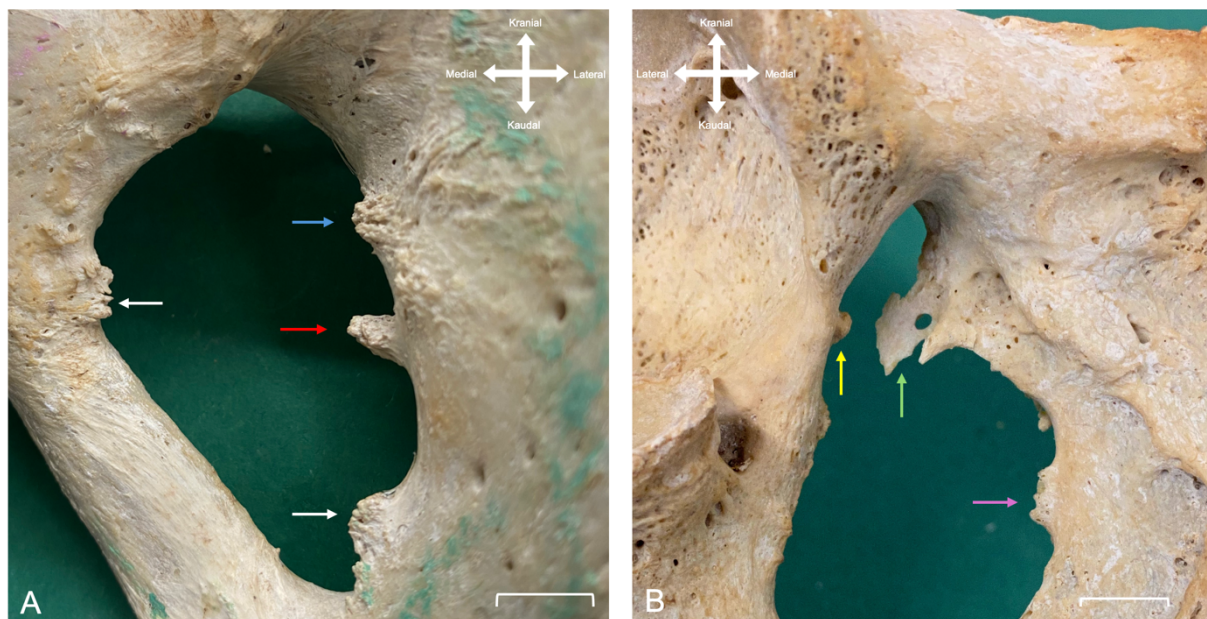


Abbildung 7: Detailaufnahmen von Exostosen im Foramen obturatum.

A: Präparat Nr. 1, posteriore Ansicht des rechten Os coxae. Roter Pfeil: Horizontal ausgerichtete Exostose vom Typ B. Weiße Pfeile: Exostosen vom Typ A. Blauer Pfeil: Posteriore Obturatortuberkel. Maßstab = 1 cm.

B: Präparat Nr. 13, anteriore Ansicht des rechten Os coxae. Grüner Pfeil: Exostose vom Typ C1. Lila Pfeil: Exostosen vom Typ B. Gelber Pfeil: Posteriore Obturatortuberkel. Maßstab = 1 cm.

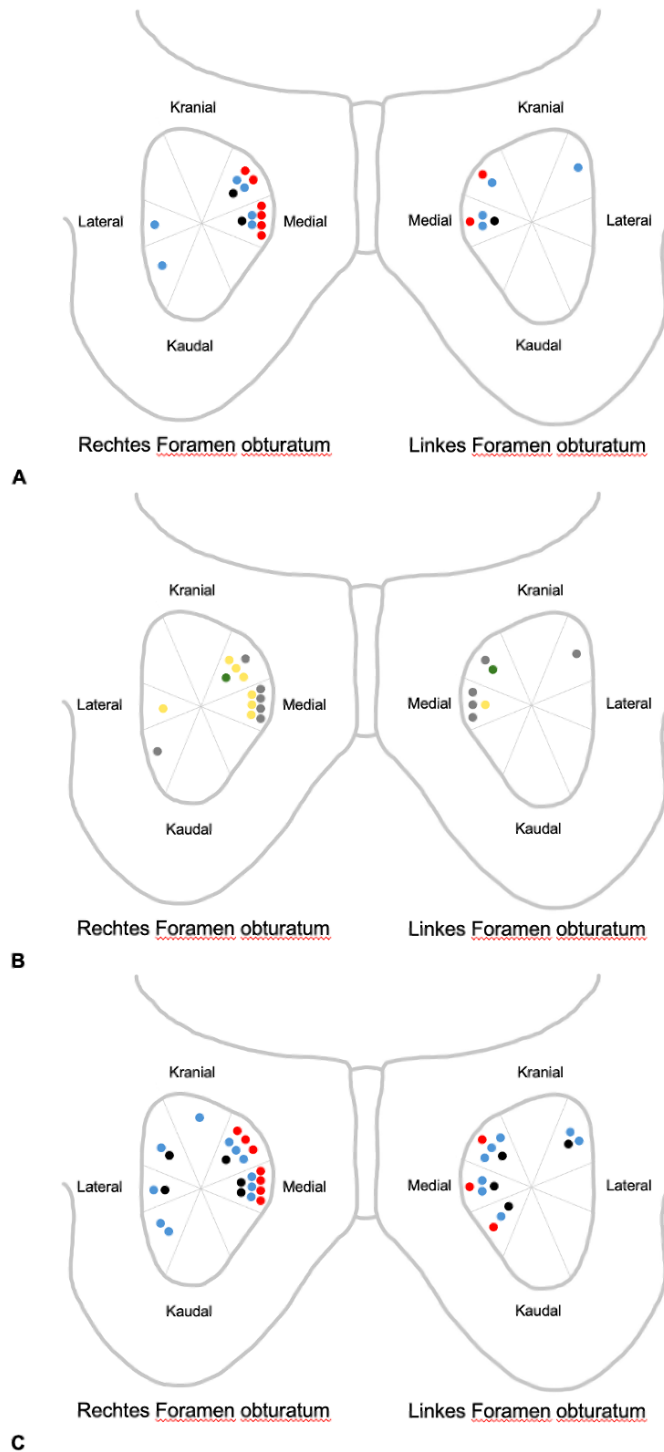


Abbildung 8: Lokalisation der Exostosen im Foramen obturatum.

Exostosen des Foramen obturatum sind mit farbigen Punkten dargestellt.

A: Lokalisation der dominanten Exostosen. Rote Punkte repräsentieren Exostosen in Hüftbeinen von Frauen, blaue Punkte Exostosen in männlichen Hüftbeinen. Wenn das Geschlecht nicht bestimmt werden konnte, wurde ein schwarzer Punkt verwendet.

B: Graue Punkte repräsentieren Exostosen vom Typ A, orangene Punkte Exostosen vom Typ B und grüne Punkte Exostosen vom Typ C.

C: Lokalisation sowohl dominanter als auch zusätzlicher Exostosen. Rote Punkte repräsentieren Exostosen in weiblichen Hüftbeinen, blaue Punkte Exostosen in Hüftbeinen von Männern. Wenn das Geschlecht nicht bestimmt werden konnte, wurde ein schwarzer Punkt verwendet.

4.3. Ossifizierte Bandstrukturen

Ossifikationen wurden am Ligamentum transversum acetabuli (LTA), Ligamentum sacrotuberale (LST) und Ligamentum sacrospinale (LSS) festgestellt.

Mit insgesamt 13 betroffenen Acetabuli (5,9 %) war das LTA am häufigsten ossifiziert. Zwei Fälle zeigten eine vollständige Ossifikation; in einem weiteren war das Band von lateral und medial fast vollständig durchbaut, sodass nur ein 1 mm breiter Spalt verblieb. Die übrigen zehn Fälle wiesen alle partielle, lateral beginnende Ossifikationen auf. Die morphologische Bandbreite dieser Befunde ist exemplarisch in Abbildung 9 dargestellt.

Ein teilweise verknöchertes LST wurde in vier Fällen beobachtet, davon zwei mit auffälligen Längen über 20 mm. Eine beginnende Ossifikation des LSS trat lediglich in einem Fall auf. Charakteristische Beispiele für diese Veränderungen zeigt Abbildung 10, die jeweils ein ossifiziertes LST sowie ein ossifiziertes LSS in unterschiedlichen Ansichten wiedergibt.

Zusätzlich fiel auf, dass in einzelnen Präparaten kombinierte Befunde vorkamen: So wurden beispielsweise Ossifikationen des LTA zusammen mit solchen des LST dokumentiert. In einem Fall war die Kombination mit einer Exostose im Foramen obturatum verbunden.

Eine Übersicht der Befunde ist in Tabelle 2 dargestellt.

Präparat Nr.	Seite	Geschlecht	Betroffene Bandstruktur	Länge der Ossifikation in mm	Ort der Ossifikation	Zusätzliche Variationen
1	Rechts	Männlich	LTA	12,91	Lateral	
2	Rechts	Männlich	LST LTA	4,55 17,85	Kaudal Lateral	Exostose Foramen obturatum (8,02 mm)
3	Rechts	Weiblich	LTA	7,37	Lateral	
4	Rechts	Weiblich	LTA	6,43	Lateral	
5	Rechts	Weiblich	LTA	8,21	Lateral	
6	Rechts	Weiblich	LTA	Komplett		
7	Rechts	Weiblich	LTA	24,18	Lateral	
8	Links	Männlich	LTA	8,42	Lateral	
9	Links	Männlich	LSS	11,72	Kaudal	
10	Links	Männlich	LTA	Komplett		
11	Links	Männlich	LST LTA	7,11 9,85 10,15	Kaudal Lateral Medial	
12	Links	Weiblich	LTA	4,68	Lateral	
13	Links	Weiblich	LST LTA	21,5 4,76	Kaudal Lateral	
14	Links	Weiblich	LST	32,86	Kaudal	

Tabelle 2: Länge (in mm) von ossifizierten Bändern am Becken

Gezeigt ist eine Übersicht über Vorkommen und Länge ossifizierter Bandstrukturen. Die Daten sind im Seiten- und Geschlechtervergleich aufgeführt. LTA = Ligamentum transversum acetabuli, LST = Ligamentum sacrotuberale, LSS = Ligamentum sacrospinale, Lat. = laterale Ossifikation, Med. = mediale Ossifikation

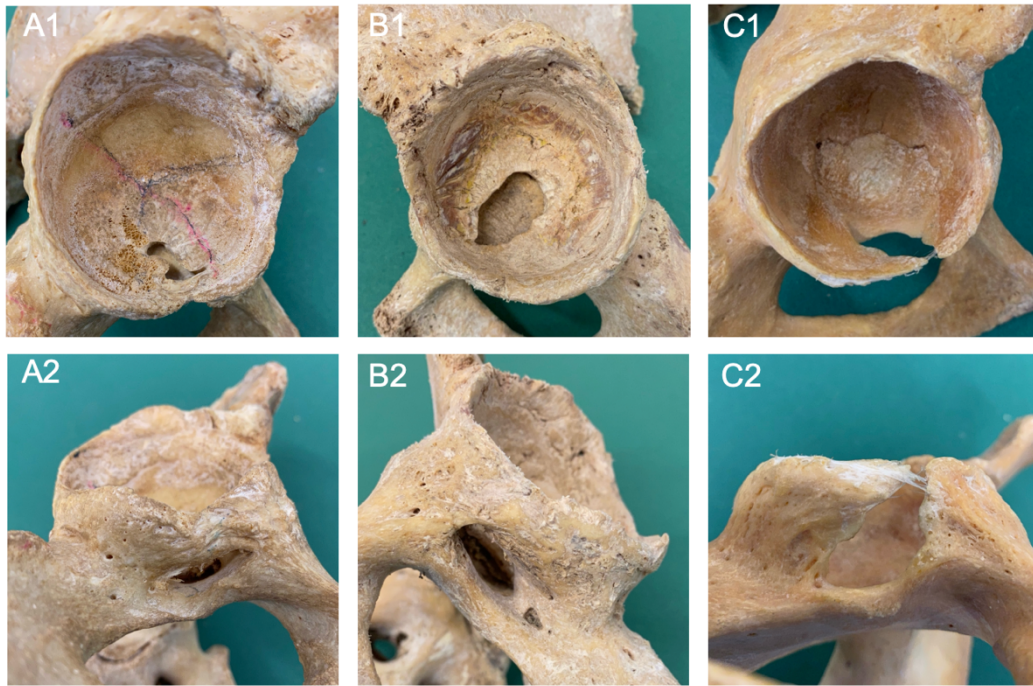


Abbildung 9: Ossifizierte bzw. teilossifizierte Ligamenta transversa acetabuli (LTA).

Dargestellt sind drei Präparate mit ossifizierten Strukturen des LTA.

A: Präparat 6, vollständige Ossifikation.

B: Präparat 10, vollständige Ossifikation.

C: Präparat 11, partielle Ossifikation.

Bei allen Präparaten zeigt die obere Reihe (1) die Ansicht auf das Acetabulum, die untere Reihe (2) die Ansicht von kaudal.

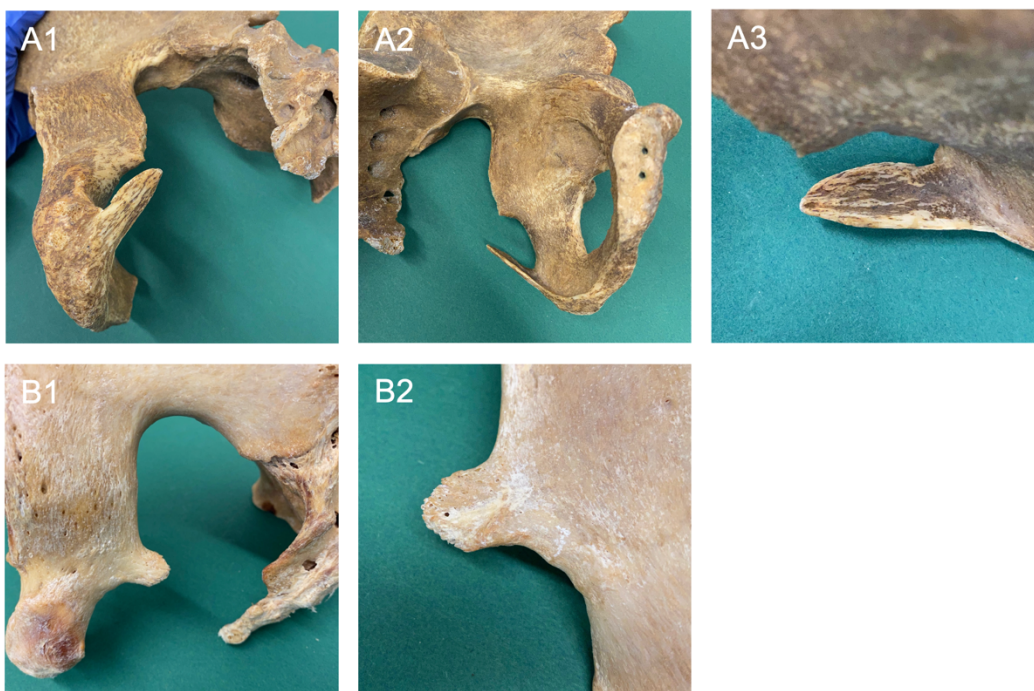


Abbildung 10: Ossifikationen des Ligamentum sacrotuberale (LST) und Ligamentum sacrospinale (LSS).

A: Präparat 14 mit ossifiziertem LST. A1: Ansicht von kaudal, A2: Ansicht von ventral/medial, A3: Detailaufnahme der ossifizierten Struktur.

B: Präparat 9 mit ossifiziertem LSS. B1: Ansicht von dorsal, B2: Detailaufnahme von ventral.

5. Diskussion

5.1. Exostosen im Foramen obturatum

Das Foramen obturatum ist ein wesentlicher Bestandteil des Beckenrings und trägt durch seine Form und Lage zur Stabilität des Beckens sowie zur Positionierung des Acetabulums bei. Diese Stellung ermöglicht eine effiziente Kraftübertragung von Rumpf zu unterer Extremität sowie eine dynamisch unterstützte Beweglichkeit des Hüftgelenks (Neumann 2010). Darüber hinaus dient das Foramen als Durchtrittspforte für die Arteria und Vena obturatoria und den Nervus obturatorius, der motorisch die Adduktorenmuskulatur und sensibel die mediale Oberschenkelregion versorgt (Achtari *et al.* 2006; Standring 2020). Exostosen im Bereich des Foramen obturatum können nicht nur die lokale Beweglichkeit und das Gleitverhalten benachbarter Weichteile beeinträchtigen, sondern auch neurovaskuläre Kompressionen mit klinischer Relevanz verursachen (Singh 2012).

Knöcherne Variationen des Foramen obturatum stellen ein seltenes Phänomen dar. Es existieren drei Fallberichte aus Indien, die über Knochensporne (Singh 2012), ein doppeltes Foramen obturatum (Mudiraj und Jahagirdar 2011) und ein dreigeteiltes Foramen obturatum (Das *et al.* 2006) berichten. Das *et al.* (2006) beschrieben ein dreigeteiltes Foramen obturatum, bei dem innerhalb des Hauptforamens zwei übereinander angeordnete akzessorische Öffnungen durch knöcherne Septen abgegrenzt waren mit einem maximalen Durchmesser von 1,1 cm bzw. 1,8 cm. Mudiraj und Jahagirdar (2011) fanden eine knöcherne Brücke, die das rechte Foramen obturatum in einen oberen und einen unteren Teil trennte. Singh (2012) entdeckte mehrere kleine, fingerartige Exostosen medial und lateral im Foramen obturatum. Das *et al.* (2006) und Singh (2012) führen die Ursache dieser Phänomene auf ein biomechanisches Ungleichgewicht zurück und vermuten, dass eine übermäßige Belastung der Muskulatur zu Mikroverletzungen führen kann, die eine Ossifikation stimulieren. Dabei handelt es sich insbesondere um den Musculus obturatorius externus und den Musculus obturatorius internus, die von der Membrana obturatoria und ihren knöchernen Begrenzungen entspringen. Singh (2012) nennt zudem einen gestörten Kalziumstoffwechsel, Hüftgelenksluxationen und Lähmungen der Glutealmuskulatur als mögliche Ursachen.

Die Theorie des biomechanischen Ungleichgewichts wird durch eine Studie von Wollgarten *et al.* (2012) gestützt, die die funktionellen Differenzierung der Membrana obturatoria untersuchten. Die Autoren fanden heraus, dass die Hauptrichtung der Fasern der Membrana obturatoria mit den Zugkräften der Musculi obturatorii internus und externus übereinstimmt und dass diese Muskeln die Form der Membran beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen drei Hauptfaserzüge, wobei der mittlere nahezu senkrecht zur Sagittalebene der Symphyse verläuft, während der obere und untere Faserzug sich schräg medialwärts ausrichten.

Zusätzlich gibt es einen radiologischen Fallbericht über ein vollständig verdoppeltes Foramen bei einem 44-jährigen Traumapatienten aus Griechenland (Karantanas *et al.* 2002). Die Autoren beschreiben eine abgerundete Knochenbrücke, die sich von ventral nach dorsal erstreckt, und interpretierten den Befund als kongenitale Fehlbildung, möglicherweise im Rahmen einer einseitigen Beckenhypoplasie.

Knöcherne Variationen des Foramen obturatum und des Canalis obturatorius wurden auch bei anderen Säugetierarten gefunden. Tae *et al.* (2014) klassifizierten den Canalis obturatorius bei 26 Hirscharten aus den Unterfamilien Cervinae und Capreolinae in vier Kategorien: Typ I umfasst ein Foramen obturatum ohne Tuberkel oder Einkerbungen; Typ II weist kleine Tuberkel auf; Typ III zeigt ausgeprägtere Tuberkel, die einen fast geschlossenen Kanal bilden; und Typ IV beschreibt einen vollständig separierten Kanal. Eine morphologische Studie an Neuseelandkaninchen, mit der Hauskatze als Vergleichsart, dokumentierte spitze Exostosen kranial und kaudal im Foramen obturatum (El-Ghazali und El-Behery 2018). Bei einem gesunden Hund wurde radiologisch ein einzelnes rudimentäres Foramen obturatum auf der rechten Seite sowie ein verdoppeltes rudimentäres Foramen auf der linken Seite identifiziert (Proks *et al.* 2023).

Die in unserer Studienpopulation ermittelte Prävalenz von 9,5 % erscheint sehr hoch. Eine mögliche Erklärung könnte der Alterseffekt aufgrund der Körperspenden sein, da die meisten Körperspender unseres Instituts älter als 60 Jahre sind. Es wurde gezeigt, dass die Prävalenz von Exostosen im Bereich der Kiefer ab einem Alter von 60 Jahren leicht ansteigt (Jainkittivong und Langlais, 2000). Zudem könnte die Prävalenz in verschiedenen Populationen unterschiedlich sein, wie es für palatinale Exostosen nachgewiesen wurde (Nery *et al.* 1977). Leider liegen entsprechende Daten für das Foramen obturatum nicht vor.

Exostosen des Foramen obturatum müssen von den anterioren und posterioren Tubercula obturatoria unterschieden werden. Diese weisen eine charakteristische Lokalisation auf, können jedoch in verschiedenen Formen existieren oder sogar fehlen (Standring, 2020). Da sich die Tubercula obturatoria in der Nähe des Nervus obturatorius befinden (Bilgili *et al.* 2013), könnten Variationen dieser Strukturen zu einer Kompression des Nervs führen. In manchen Fällen könnte eine eindeutige Unterscheidung zwischen Tuberkel und Exostose schwierig sein (Birkner und Consentius, 1977). Daher erscheint es sinnvoll, im Rahmen zukünftiger Studien ein Klassifikationssystem für Tubercula obturatoria zu entwickeln.

Die Exostosen treten an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Foramen obturatum auf und variieren in ihrer Form. Unsere Präparate zeigen eine Häufung von Exostosen im medialen Bereich des Foramen obturatum. Zudem entspricht die Orientierung der Exostosen weitgehend den Ergebnissen der oben genannten Studien (Mudiraj und Jahagirdar 2011; Singh 2012). Die knöchernen Vorsprünge sind hauptsächlich medial verteilt und verlaufen

überwiegend horizontal (Abb. 8B). Sie könnten somit der Faserorientierung des Musculus obturatorius externus und der Membrana obturatoria folgen (Birkner und Consentius 1977). Die Entstehung von Knochensporen durch übermäßige Belastung wird zudem durch die Tatsache gestützt, dass relativ mehr rechte Beckenhälften betroffen sind. In der Allgemeinbevölkerung ist das rechte Bein häufig dominant, was zu einer relativ höheren Belastung dieser Seite führt (Teo *et al.* 2017). Weitere Untersuchungen an größeren Stichproben könnten möglicherweise eine signifikante Korrelation zwischen der betroffenen Beckenhälfte und dem Auftreten von Exostosen nachweisen.

Knöcherne Vorsprünge können zu Beschwerden wie Nervenkompressionssyndromen, lokalen Entzündungen, Bewegungseinschränkungen, diagnostischen Herausforderungen und chirurgischen Komplikationen führen (Göçmen *et al.* 2014). Das Erkennen dieser anatomischen Variationen kann die chirurgische Planung verbessern und präzisere sowie sicherere Eingriffe ermöglichen (Okui *et al.* 2009; Achtari *et al.* 2006).

5.2. Ossifizierte Bandstrukturen

Das Ligamentum transversum acetabuli (LTA), das Ligamentum sacrospinale (LSS) und das Ligamentum sacrotuberale (LST) sind zentrale strukturelle Komponenten des Beckens, die eine entscheidende Rolle für die Stabilität und Funktionalität der lumbosakralen und sakropelvinen Region spielen.

5.2.1. Ligamentum transversum acetabuli (LTA)

Mehrere anatomische und klinische Studien haben das Auftreten ossifizierter Ligamenta transversa acetabuli beschrieben. Die Befunde variieren hinsichtlich Seite, Ausprägung (vollständig oder unvollständig) und Begleitveränderungen.

Perumal *et al.* (2014) berichteten in ihrer Untersuchung von insgesamt 214 Trockenpräparaten über fünf vollständig ossifizierte LTA auf der linken Seite. Zusätzlich fanden sie inkomplett ossifizierte Strukturen in 14 rechten und 13 linken Hüftknochen, was auf eine relativ häufige partielle Ossifikation hinweist. Auch Chakravarthi *et al.* (2017) dokumentierten sieben ossifizierte LTA von insgesamt 228 Hüftknochen (114 rechte, 114 linke), während Tirpude *et al.* (2018) in ihrem Fallbericht eines Beckenknochens eine vollständige Ossifikation des LTA auf der rechten Seite sowie eine partielle Ossifikation links beschrieben. Bemerkenswert war hierbei eine gleichzeitige partielle Verknöcherung des Ligamentum sacrotuberale, was auf eine mögliche systemische Tendenz zur Bandverknöcherung hinweist.

Agarwal (2022) fand in vier von 128 Hüftknochen ein vollständig ossifiziertes LTA (2 links, 2 rechts). Zudem konnte in einem Becken eine kombinierte Ossifikation von LTA, LST und LSS nachgewiesen werden. Sharmila *et al.* (2011) beschrieben einen besonders ausgeprägten Fall mit beidseitiger vollständiger Ossifikation des LTA in Kombination mit einer Ankylose beider Iliosakralgelenke, was auf eine generalisierte pathologische Veränderung des Beckengürtels hinweist. Nomani *et al.* (2023) berichteten über eine vollständige Ossifikation des LTA bei einem 65-jährigen Körperspender, bei dem die Incisura acetabuli in ein geschlossenes Foramen umgewandelt war.

Diese Funde zeigen, dass eine Ossifikation des LTA häufiger auftritt als früher angenommen, insbesondere in inkompletter Form, und sie kann sowohl einseitig als auch beidseitig sowie alleinstehend oder kombiniert mit anderen ligamentären Ossifikationen auftreten. Die klinische Relevanz eines ossifizierten Ligamentum transversum acetabuli liegt vor allem in den möglichen funktionellen Einschränkungen und Komplikationen bei chirurgischen Eingriffen. Eine Verknöcherung kann die Beweglichkeit des Hüftgelenks einschränken und zu einer Kompression neurovaskulärer Strukturen führen, insbesondere der A. obturatoria, was ischämische Symptome im Bereich des Femurkopfs verursachen kann (Konarska-Włosińska *et al.* 2024; Barrington *et al.* 2017). Besonders bei vollständig ossifizierten Strukturen kann es

zur Ausbildung eines geschlossenen Foramens kommen, das den Durchtritt von Gefäßen und Nerven erheblich einengt und sowohl ischämische Symptome als auch intraoperative Schwierigkeiten, etwa bei der Reposition oder Manipulation des Femurkopfs, verursachen kann (Nomani *et al.* 2023). Klinisch bedeutsam ist das LTA zudem in der Endoprothetik, da es als Landmarke bei der Ausrichtung der Acetabulum-Komponente dient und eine Ossifikation den intraoperativen Zugang erschweren kann.

Die histologische Untersuchung der fetalen Entwicklung des menschlichen Acetabulums durch Walker (1981) zeigte, dass sich die Ossifikation während der gesamten pränatalen Periode ausschließlich im Boden des Acetabulums nachweisen lässt, während die Pfannenwände knorpelig bleiben und das Labrum aus faserigem Gewebe besteht. Vor diesem Hintergrund erscheint die in neueren Arbeiten diskutierte Pathogenese einer vollständigen LTA-Ossifikation besonders bemerkenswert. Nomani *et al.* (2023) postulieren ein zusätzliches Ossifikationszentrum im Bereich der Y-förmigen Wachstumsfuge des Acetabulums oder eine heterotope Knochenbildung infolge traumatischer oder entzündlicher Prozesse als mögliche Erklärung.

Eine weitere Erklärung liefert die heterotope Ossifikation, bei der Knochengewebe außerhalb des Skeletts entsteht. Auslöser können mechanischer Stress, wiederholte Mikrotraumata oder altersbedingte Veränderungen sein. Besonders häufig tritt dies nach operativen Eingriffen im Bereich des Acetabulums auf, wobei Prophylaxe und Therapie (Bestrahlung, NSAR, Bisphosphonate) kontrovers diskutiert werden (Firoozabadi *et al.* 2017).

Die Brooker-Klassifikation dient der Einordnung solcher heterotopen Ossifikationen im Hüftbereich. Sie unterscheidet vier Schweregrade (Tab. 3):

Grad	Beschreibung
Grad 1	Kleine Knocheninseln in Weichgewebe/Bändern
Grad 2	Knocheninseln mit einem Abstand > 1 cm zwischen Becken und Femur
Grad 3	Knocheninseln mit einem Abstand < 1 cm zwischen Becken und Femur
Grad 4	Vollständige knöcherne Ankylose des Hüftgelenks

Tabelle 3: Brooker-Klassifikation heterotoper Ossifikationen im Hüftbereich
nach Brooker *et al.* 1973

Molekularbiologisch wird angenommen, dass Störungen in Entwicklungsfaktoren wie Wnt/ β -Catenin, GDF5/6 und FGF10 zur aberranten Knochenbildung im ligamentären Gewebe beitragen (Guo *et al.* 2004; Buxton *et al.* 2001; Settle *et al.* 2003; Merino *et al.* 1999; Sekine *et al.* 1999). Auch inflammatorische Signalwege (TNF- α , Angiopoietin-2) können über die Aktivierung osteogener Faktoren wie Osterix (OSX) beteiligt sein (Zhang *et al.* 2024).

5.2.2. Ligamentum sacrotuberale (LST) und Ligamentum sacrospinale (LSS)

Eine Ossifikation des Ligamentum sacrotuberale (LST) oder des Ligamentum sacrospinale (LSS) kann den anatomischen Raum im Foramen ischiadicum minus erheblich einengen und zu Nervenkompressionen führen, die mit chronischen Schmerzen im Beckenbodenbereich verbunden sind (Siddiqui *et al.*). Eine Kompression des N. ischiadicus ist ebenfalls beschrieben. Goddyn *et al.* berichten über eine 37-jährige Patientin, bei der eine ossäre Metaplasie des Ligamentum sacrospinum zu einem klinischen Bild einer „truncated sciatica“ führte.

Auch atypische Gesäßschmerzen durch Kompression lumbosakraler Nerven sind beschrieben, insbesondere bei ossifiziertem LSS (Chu *et al.*). Als pathogenetische Faktoren werden Stresskonzentrationen, Traumafolgen oder metabolische Einflüsse diskutiert (Chu *et al.*).

In unserer Untersuchung wurden teilweise ossifizierte LST in vier Fällen beobachtet, darunter zwei auffällig lange Ossifikationen von über 20 mm (maximal 32,86 mm). Das LSS war nur in einem Fall ossifiziert (11,72 mm), was dessen Seltenheit unterstreicht.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Literaturangaben, die ebenfalls ein deutlich häufigeres Auftreten von LST-Verknöcherungen im Vergleich zum LSS zeigen. Prescher (1993) fand in acht von 101 Präparaten ein ossifiziertes LST, alle bei männlichen Individuen. Agarwal *et al.* beschrieben in ihrem Fallbericht eine vollständige Ossifikation des LST in Kombination mit einer LSS-Ossifikation und einer beidseitigen Ankylose der Iliosakralgelenke. Chu *et al.* berichteten über zwei klinische Fälle mit bilateraler LST-Ossifikation, von denen einer symptomatisch war (lokale Schmerzen bei längerem Sitzen, PNE-Symptomatik), der andere hingegen asymptomatisch blieb. Sharmila *et al.* dokumentierten die Kombination aus ossifiziertem LST, LSS und LTA in Verbindung mit einer fortgeschrittenen Iliosakralgelenksankylosierung. Beyth *et al.* konnten zudem eine posttraumatische Myositis ossificans des LST nach Beckenringverletzung nachweisen, was die Rolle traumatischer Ereignisse als Auslöser unterstreicht.

Im Vergleich zu diesen Berichten zeigt sich, dass die in unserer Studie gefundenen LST-Ossifikationen zwar kürzer als in den meisten Fallberichten mit kompletter Ossifikation waren, jedoch aufgrund der Länge von > 20 mm in zwei Fällen potenziell klinisch relevant sein könnten – insbesondere in Hinblick auf eine mögliche Kompression des N. pudendus im Foramen ischiadicum minus. Das seltene Auftreten eines ossifizierten LSS in unserem Kollektiv entspricht den Literaturdaten, die zeigen, dass isolierte LSS-Ossifikationen meist nur als Nebentbefund oder in Kombination mit LST-Veränderungen auftreten (Tirpude *et al.*; Agarwal *et al.*). Darüber hinaus zeigen Untersuchungen zu ossifizierten Strukturen im Bereich des

Ligamentum transversum acetabuli, dass eine solche Verknöcherung neurovaskuläre Engstellen im Bereich der Acetabularnotch verursachen kann und bei operativen Eingriffen an der Hüfte die Orientierung sowie die Reposition des Femurkopfs erschweren kann (Perumal *et al.*; Nomani *et al.*).

5.2.3. Vergleichende Betrachtung ossifizierter Strukturen im Beckenbereich

Der Vergleich unserer Ergebnisse zu Exostosen im Foramen obturatum sowie zu ossifizierten Bandstrukturen (LTA, LST, LSS) zeigt, dass knöcherne Veränderungen im Beckenbereich in unserem Kollektiv häufiger vorkommen, als es in vielen Literaturangaben beschrieben ist. Während die Exostosen im Foramen obturatum mit einer Prävalenz von 9,5 % ein bemerkenswert häufiges Vorkommen aufwiesen, zeigte sich die Ossifikation ligamentärer Strukturen insgesamt seltener, mit Schwerpunkt auf dem Ligamentum transversum acetabuli (5,88 %). Ossifikationen des LST traten deutlich seltener auf, das LSS war nur in einem Einzelfall betroffen. Dieses Muster deckt sich mit den Literaturdaten, die eine höhere Inzidenz von LTA-Verknöcherungen im Vergleich zu LST und insbesondere LSS berichten (Perumal *et al.* 2014; Chakravarthi *et al.* 2017; Prescher 1993; Agarwal *et al.* 2022; Chu *et al.* 2024; Nomani *et al.* 2023). Damit bestätigen unsere Ergebnisse zwar die in der Literatur berichtete Häufigkeitsverteilung, sie zeigen jedoch auch, dass die Gesamtprävalenz ossifizierter Strukturen im Beckenbereich möglicherweise unterschätzt wird.

Im Vergleich zu den Fallberichten und Sammlungen in der Literatur waren die bei uns gemessenen Ossifikationen zwar meist kürzer als in Fällen mit kompletter Bandverknöcherung oder fortgeschrittener Ankylose, dennoch können längere Ossifikationen des LST oder ein fast vollständiger Verschluss des LTA potenziell klinische Relevanz besitzen – beispielsweise durch die Beeinflussung des neurovaskulären Durchtrittsraums oder durch mechanische Einschränkungen im Gelenkbereich. Dies deckt sich mit klinischen Beobachtungen, wonach ligamentäre Ossifikationen insbesondere durch die Nähe zu Gefäß- und Nervenstrukturen (N. pudendus, A. circumflexa femoris medialis) symptomatisch werden können (Siddiqui *et al.*; Goddyn *et al.*). Hierbei ist hervorzuheben, dass unser Kollektiv keine klinischen Daten enthielt und die funktionelle Bedeutung daher nicht direkt überprüft werden konnte.

Zur besseren Einordnung unserer Befunde und zur strukturierten Darstellung des Forschungsstandes haben wir eine vergleichende Tabelle erstellt, die zentrale Parameter, diagnostische Methoden, morphologische Details und klinische Relevanz der bisher publizierten Studien zu ossifizierten Bandstrukturen im Beckenbereich zusammenfasst (Tab. 4). Unsere Arbeit erweitert diese Daten durch eine vergleichsweise große Zahl osteologischer Präparate, die eine detaillierte und einheitliche morphologische Analyse sowie eine strukturierte Gegenüberstellung mit den bisherigen Studien ermöglichen.

5.2.4. Limitationen

Da unsere Studie an aufbewahrten Knochenpräparaten unbekannten Ursprungs durchgeführt wurde, sind wir hinsichtlich Informationen über das Alter und die Krankengeschichte der Körperspender eingeschränkt. Außerdem wurden die Hüftknochen einzeln aufbewahrt, sodass nur in wenigen Fällen die linke und rechte Seite zugeordnet werden konnten. Daher wurde das bilaterale Auftreten in dieser Studie nicht berücksichtigt. Dies stellt eine wesentliche Limitation dar, da gerade bilaterale Befunde klinisch von besonderem Interesse sein könnten. Da es sich um mazerierte Knochen handelt, fehlen Informationen über das umliegende Weichgewebe. So bleibt unklar, inwieweit ligamentäre Ossifikationen funktionell relevant waren oder ob sie von degenerativen Prozessen begleitet wurden. Besonders interessant erscheint die Frage, ob Exostosen und ligamentäre Ossifikationen unterschiedliche pathogenetische Mechanismen widerspiegeln oder gemeinsame Risikofaktoren teilen.

Insgesamt unterstreicht der Vergleich, dass knöcherne Veränderungen im Bereich des Beckens – sei es in Form von Exostosen oder ligamentären Ossifikationen – in anatomischen Sammlungen nicht nur als Zufallsbefunde, sondern als potenziell relevante Varianten betrachtet werden sollten. Die Häufigkeit und Verteilung in unserem Kollektiv deuten darauf hin, dass solche Befunde möglicherweise unterschätzt werden, insbesondere da viele davon asymptomatisch bleiben und nur bei gezielter Untersuchung auffallen. Ein weiterer Schritt könnte die Kombination osteologischer Studien mit bildgebenden Verfahren und klinischen Daten sein, um die Brücke zwischen morphologischer Beobachtung und funktioneller Relevanz zu schlagen.

Autor/ Jahr	Band- struktur	Patienten- kollektiv	Pathologie	Diagnostik	Morphologie	Relevanz
C. Goddyn <i>et al.</i> 2009	LSS	Einzelfall, 37- jährige Frau	Einseitige ossäre Metaplasie LSS rechts, Kompression N. ischiadicus	Röntgen, CT, 3D-CT	Ossifikation LSS, retrovertiertes Acetabulum	Seltene Ursache subpiriformer Kompression, Bedeutung biomechanischer Dysbalance
G.A. Agrons <i>et al.</i> 1993	LSS	Einzelfall, 4- jährige Patientin	Posttraumatische Myositis ossificans LSS rechts	CT, 3D-CT	Ossäre Dichte entlang LSS	Selten bei Kindern; relevant für Stabilitätsbeurteilung
Siddiqui <i>et al.</i> 2020	LSS	Einzelfall, Geschlecht und Herkunft unbekannt	Komplette Ossifikation des LSS rechts, zusätzlich ISG- und lumbosakrale Ankylose	Makroskopie	Ursprung breit am Sakrum, Verlauf bis Spina ischiadica, Endigung verdickt	Risiko für Nervenkompression (v. a. N. pudendus, N. ischiadicus)
Prescher 1993	LST	101 Becken- präparate(8 Fälle, nur Männer)	Intraligamentäre Sporne vom Tuber ischiadicum	Makroskopie, Röntgen	Länge 1,1–7,2 cm, spongiöses Inneres	Ossifikationen meist erworben, Begriff „Sporn des Tuber ischiadicum“ empfohlen
Arora <i>et al.</i> 2009	LST	Einzelfall, männlich	Partielle Ossifikation LST rechts	Makroskopie, Röntgen	Länge 7,6 cm, spiralige Oberfläche	Potenzielles Pudendus- Kompressionssyndrom
Greenspan <i>et al.</i> 2009	LST	5 Männer (radiologische Zufallsbefunde)	„Pelvic Digit“ – kongenitale Knochenbildungen	Röntgen	Länge 2,5–6,5 cm, pseudoartikuliert	Fehlbildung ohne Krankheitswert, Differenzialdiagnose extraossärer Verkalkungen
Beyth <i>et al.</i> 2002	LST	Einzelfall, 42- jähriger Mann, Trauma	Posttraumatische Myositis ossificans LST rechts	Röntgen, CT	Ossifikation STL rechts > links	Spätfolge nach Beckenringverletzung, wichtig bei posttraumatischen Schmerzen
Chu <i>et al.</i> 2024	LST	2 Fälle und Literatur (15 Fälle)	Ossifikation LST meist bilateral, ältere Männer	Röntgen, CT, MRT	Länge 1,1–7,2 cm, „Antilopenhorn“-Form	Meist asymptomatisch, gelegentlich PNE-Syndrom
Tirpude <i>et al.</i> 2018	LST, LTA	Einzelfall, männliches Beckenpräparat	LST links teilw. ossifiziert, LTA rechts komplett, links partiell	Makroskopie	LST 54 mm, LTA 31,2 mm (rechts)	Kompression Pudendusnerv, A. circumflexa femoris medialis
Sharmila <i>et al.</i> 2011	LSS, LST, LTA	Einzelfall, männliches Beckenpräparat	Bilat. ISG-Ankylose, LSS rechts komplett, LST partiell bds., LTA komplett bds.	Makroskopie	LSS 4,4 cm (R), LST 2,8–2,9 cm, LTA 3,5– 3,6 cm	Eingeschränkte Beweglichkeit, mögliche Nervenkompression
Chakravarthi <i>et al.</i> 2017	LTA	228 Ossa coxae/femora	Ossifiziertes Labrum + LTA (3,07 %), Kapselossifikation (1,75 %)	Makroskopie	Umwandlung Incisura acetabuli in Foramen	Bewegungseinschränkung, potenzielle Gefäßkompression
Perumal <i>et al.</i> 2014	LTA	214 Ossa coxae	LTA komplett (4,3% links), inkomplett (14 % rechts, 11,4 % links)	Makroskopie	Länge 1,5–2,8 cm	Relevanz bei Hüft-TEP, potenzielle Gefäßkompression
Nomani <i>et al.</i> 2023	LTA, LST, LSS	128 Ossa coxae, 6 Becken	LTA komplett (3,12 %), LST komplett rechts, LSS komplett links	Makroskopie	LTA 4,2–5,0 cm, LST 8,6 cm, LSS 6,4 cm	Bewegungseinschränkung, mögliche neurovaskuläre Kompression
Agarwal 2022	LTA, LST, LSS	128 Ossa coxae, 6 Becken	LTA komplett (3,12 %), LST komplett rechts, LSS komplett links	Makroskopie	LTA 4,2–5,0 cm, LST 8,6 cm, LSS 6,4 cm	Bewegungseinschränkung, potenzielle Kompression neurovaskulärer Strukturen

Tabelle 4: Vergleich publizierter Fallberichte und Studien zu ligamentären Ossifikationen im Beckenbereich

(LSS = Ligamentum sacrospinale, LST = Ligamentum sacrotuberale, LTA = Ligamentum transversum acetabuli, ISG = Iliosakralgelenk, PNE = Pudendusnervenkompressionssyndrom)

6. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie an 221 Ossa coxae wurden ossifizierte Bandstrukturen in 5,88 % der untersuchten Präparate nachgewiesen, wobei das Ligamentum transversum acetabuli am häufigsten betroffen war. Vollständige Ossifikationen waren selten, partielle Verknöcherungen überwogen deutlich. Das Ligamentum sacrotuberale zeigte in vier Fällen partielle Ossifikationen, das Ligamentum sacrospinale war nur einmal betroffen. Exostosen im Foramen obturatum konnten mit einer Prävalenz von 9,5 % dokumentiert werden.

Der Vergleich mit der Literatur bestätigt, dass Ossifikationen im Bereich der Beckenbänder und angrenzender Strukturen häufiger vorkommen, als lange Zeit angenommen, meist jedoch als Zufallsbefund ohne klinische Symptomatik entdeckt werden. Dennoch können ausgeprägte oder kombinierte Ossifikationen funktionelle Einschränkungen oder Komplikationen bei operativen Eingriffen verursachen.

Da die vorliegende Untersuchung an osteologischen Präparaten aus der anatomischen Sammlung durchgeführt wurde, lagen keine Informationen zu Alter, Geschlecht oder klinischer Vorgeschichte der Körperspenden vor. Ebenso konnte ein mögliches bilaterales Auftreten aufgrund der getrennten Lagerung der Präparate nicht systematisch erfasst werden. Trotz dieser Limitationen sind Studien an osteologischen Präparaten von großer Bedeutung, um morphologische Varianten detailliert zu beschreiben, ihr Auftreten zu quantifizieren und ihre potenzielle klinische Relevanz abzuschätzen.

Zukünftige Untersuchungen sollten neben größeren Fallzahlen insbesondere auch radiologische und klinische Korrelationen einbeziehen, um die Häufigkeit, mögliche Risikofaktoren sowie die funktionelle und chirurgische Relevanz ossifizierter Bandstrukturen und Exostosen im Beckenbereich besser einschätzen zu können.

7. Literaturverzeichnis

1. Felsenthal N, Zelzer E. Mechanical regulation of musculoskeletal system development. *Development*. 2017;144(23):4271–4283. doi: 10.1242/dev.151266.
2. Røhl L, Larsen E, Linde F, Odgaard A, Jørgensen J. Tensile and compressive properties of cancellous bone. *J Biomech*. 1991;24(12):1143–1149. doi: 10.1016/0021-9290(91)90006-9.
3. Gardner E, Gray DJ, O’Rahilly R. *The embryology of the human skeleton*. London: University of London Press; 1975.
4. Graumann W, Sasse D. *Histologie*. 2. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer; 2004.
5. Standring S. *Gray’s Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 42. Aufl. Amsterdam: Elsevier; 2020.
6. Walker JM. Histological study of the fetal development of the human acetabulum and labrum. *Yale J Biol Med*. 1981;54(4):255–263.
7. Seeman E, Delmas PD. Bone quality: the material and structural basis of bone strength and fragility. *N Engl J Med*. 2006;354(21):2250–2261. doi: 10.1056/NEJMra053077.
8. Maciel GBM, Maciel RM, Danesi CC. Bone cells and their role in physiological remodeling. *Mol Biol Rep*. 2023;50(3):2857–2863. doi: 10.1007/s11033-022-08190-7.
9. Langdahl B, Ferrari S, Dempster DW. Bone modeling and remodeling. *Ther Adv Musculoskelet Dis*. 2016;8(6):225–235. doi: 10.1177/1759720X16670154.
10. Kim JM, Lin C, Stavre Z, Greenblatt MB, Shim JH. Osteoblast-osteoclast communication and bone remodeling. *Int J Mol Sci*. 2020; 10;9(9):2073. doi: 10.3390/cells9092073.
11. Bolamperti S, Villa I, Rubinacci A. Bone remodeling: an operational process. *Bone Res*. 2022;10:48. doi: 10.1038/s41413-022-00219-8.
12. Manolagas SC. What old means to bone. *Trends Endocrinol Metab*. 2010;21(6):369–374. doi: 10.1016/j.tem.2010.02.003.
13. Office of the Surgeon General (US). *Bone Health and Osteoporosis: A Report of the Surgeon General*. Rockville (MD): Office of the Surgeon General (US); 2004

14. Laurenson RD. The primary ossification of the human ilium. *Anat Rec.* 1964;148:209–217. doi: 10.1002/ar.1091480303.
15. Scheuer L, Black S. *The Juvenile Skeleton.* Academic Press; 2004.
16. Parvaresh KC, Upasani VV, Bomar JD, Pennock AT. Secondary ossification center appearance and closure in the acetabulum. *J Pediatr Orthop.* 2018;38(8):418–423. doi: 10.1097/BPO.0000000000000836.
17. Nowlan NC. Biomechanics of foetal movement. *Eur Cell Mater.* 2015;29:1–21. doi: 10.22203/ecm.v029a01.
18. Verbruggen SW, Nowlan NC. Ontogeny of the Human Pelvis. *Anat Rec (Hoboken).* 2017;300(4):643–652. doi: 10.1002/ar.23541.
19. Beltrami G, Ristori G, Scoccianti G, Tamburini A, Capanna R. Hereditary multiple exostoses. *Clin Cases Miner Bone Metab.* 2016;13(2):110–118. doi: 10.11138/ccmbm/2016.13.2.110.
20. Bilgili F, Gürses IA, Ökaya U, Gayretli Ö, Parmaksizoğlu AS, Cetiner Kale A. Ischial and pubic osteotomies during periacetabular osteotomies. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2013;47(1):43–47. doi: 10.3944/aott.2013.3026.
21. Birkner R, Consentius K. Verknöcherungen in der Wand des Foramen obturatum. *Rofo.* 1977;127(7):72–74. doi: 10.1055/s-0029-1230660.
22. Brooks S, Suchey JM. Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Hum Evol.* 1990;5:227–238. doi: 10.1007/BF02437238.
23. Schmitt A. Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *Int J Osteoarchaeol.* 2004;14:1–6. doi: 10.1002/oa.693.
24. Buckberry JL, Chamberlain AT. Age estimation from the auricular surface of the ilium: a revised method. *Am J Phys Anthropol.* 2002;119(3):231–239. doi: 10.1002/ajpa.10130.
25. Buikstra JE, Ubelaker DH. Standards for data collection from human skeletal remains. *Proceedings of a seminar at the Field. Museum of Natural History organized by Jonathan Haas.* Fayetteville, AR: Arkansas Archeological Survey; 1994.

26. Das S, Suri R, Kapur V. A triplicate obturator foramen. *Folia Morphol.* 2006;65(2):164–166.
27. El-Ghazali H, El-Behery E. Comparative morphological interpretation on the bones of the pelvic limb of New Zealand rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) and domestic cat (*Felis domestica*). *J Adv Vet Anim Res.* 2018;5(4):410–419. doi: 10.5455/javar.2018.e292.
28. Göçmen S, Topuz AK, Atabey C, Şimşek H, Keklikçi K, Rodop O. Peripheral nerve injuries due to osteochondromas: analysis of 20 cases and review of the literature. *J Neurosurg.* 2014;120(5):1105–1112. doi: 10.3171/2013.11.JNS13310.
29. Grupe G, Harbeck M, McGlynn GC. *Prähistorische Anthropologie.* Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum; 2015.
30. Jainkittivong A, Langlais RP. Buccal and palatal exostoses: prevalence and concurrence with tori. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2000;90(1):48–53. doi: 10.1067/moe.2000.105905.
31. Jo SY, Chang JC, Bae HG, Oh JS, Heo J, Hwang JC. A Morphometric Study of the Obturator Nerve around the Obturator Foramen. *J Korean Neurosurg Soc.* 2016;59(3):282–286. doi: 10.3340/jkns.2016.59.3.282.
32. Karantanas A, Velesiotou K, Sakellariou E. Double obturator foramen. *AJR Am J Roentgenol.* 2002;178(1):245. doi: 10.2214/ajr.178.1.1780245.
33. Neumann DA. Kinesiology of the hip: a focus on muscular actions. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2010;40(2):82–94. doi: 10.2519/jospt.2010.3025.
34. Achtari C, McKenzie BJ, Hiscock R, Rosamilia A, Schierlitz L, Briggs CA, Dwyer PL. Anatomical study of the obturator foramen and dorsal nerve of the clitoris and their relationship to minimally invasive slings. *Int Urogynecol J Pelvic Floor Dysfunct.* 2006;17(4):330–334. doi: 10.1007/s00192-005-0004-7.
35. Mudiraj NR, Jahagirdar PL. A duplicate obturator foramen - a report of rare variation. *Int J Anat Var.* 2011;4:155–156.
36. Nery EB, Corn H, Eisenstein IL. Palatal exostosis in the molar region. *J Periodontol.* 1977;48(10):663–666. doi: 10.1902/jop.1977.48.10.663.
37. Okui N, Okui M, Horie S. Improvements in overactive bladder syndrome after polypropylene mesh surgery for cystocele. *Aust N Z J Obstet Gynaecol.* 2009;49(2):226–231. doi: 10.1111/j.1479-828X.2009.00965.x.

38. Proks P, Ceplecha V, Černá P. Duplication and hypoplasia of obturator foramina in a dog. *J Small Anim Pract.* 2023;64(4):310. doi: 10.1111/jsap.13578.
39. Šaherl LK, Rakuša M. An Anatomical Description of the Obturator Region with Clinical Aspects. *J Anat Soc India.* 2022;71(3):234–241. doi: 10.4103/JASI.JASI_134_20.
40. Singh R. Bony spurs projecting in the obturator foramen. *Folia Morphol.* 2012;71(2):125–127.
41. Tae HJ, Park BY, Kim IS, Ahn D. Morphological examination of the obturator notch and canal in Cervidae. *J Vet Med Sci.* 2014;76(5):767–771. doi: 10.1292/jvms.13-0531.
42. Teo I, Thompson J, Neo YN, Lundie S, Munnoch DA. Lower limb dominance and volume in healthy individuals. *Lymphology.* 2017;50(4):197–202.
43. Wollgarten M, Koebke J, Andermahr J. Funktionelle Aspekte der Membrana obturatoria im Hinblick auf die Beckenringfraktur. *Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU);* 2012. doi: 10.3205/12dkou614.
44. Perumal A, Sathiya S. Ossified transverse acetabular ligament – an osteological study. *Int J Curr Res Rev.* 2014;6(8):37–41.
45. Chakravarthi KK, Siddaraju KS, Nelluri V, Venumadhav N, Bali S. Abnormal ossified structures around the hip joint and its clinical implications. *Int J Res Med Sci.* 2017;5:5391–5395. doi: 10.18203/2320-6012.ijrms20175461.
46. Tirpude A, Mishra P, Gaikwad M, Ravi PK, Jain M. Indiscriminate ossification of ligaments in a dry adult human male pelvis – A rarity. *Indian J Clin Anat Physiol.* 2018;5(2):281–285. doi: 10.18231/2394-2126.2018.0065.
47. Agarwal S. Clinical relevance of heterotopic ossification of hip and pelvic bones, muscles and ligaments. *Asian J Pharm Clin Res.* 2022;15(2):103–105. doi: 10.22159/ajpcr.2022.v15i2.43707.
48. Sharmila BP, Devi S, Sankar K. Bilateral ankylosis of sacro-iliac joint with ossified sacrospinous, sacrotuberous and transverse acetabular ligaments. *Int J Anat Var.* 2011;4:123–127.
49. Konarska-Włosińska M, Ostrowski P, Del Carmen Yika A, Włosiński P, Adamiak P, Kmiecik M. Exploring the topography of the obturator artery and corona mortis: a detailed analysis with surgical implications. *Int Urogynecol J.* 2024;35:1051–1060. doi: 10.1007/s00192-024-05774-8.

50. Barrington JW, Sodhi N, Ali M, Khlopas A, Sultan AA, Kee JR, Holmes KA, Hariri O, Newman JM, Mont MA. Are the anatomy textbooks wrong? A clinical patho-anatomic study of foveal vessels in the round ligament of the hip. *Ann Transl Med.* 2017;5(Suppl 3):S32. doi: 10.21037/atm.2017.11.20.
51. Nomani K, Borthakur D, Sahni C, Kumar R. Complete ossification of transverse acetabular ligament – embryological and clinical perspective. *Clin Ter.* 2023;174(4):326–330. doi: 10.7417/CT.2023.2445.
52. Firoozabadi R, Alton T, Sagi HC. Heterotopic ossification in acetabular fracture surgery. *J Am Acad Orthop Surg.* 2017;25(2):117–124. doi: 10.5435/JAAOS-D-15-00366.
53. Brooker AF, Bowerman JW, Robinson RA, Riley LH Jr. Ectopic ossification following total hip replacement. *J Bone Joint Surg Am.* 1973;55(8):1629–1632.
54. Guo X, Day TF, Jiang X, Garrett-Beal L, Topol L, Yang Y. Wnt/beta-catenin signaling is sufficient and necessary for synovial joint formation. *Genes Dev.* 2004;18:2404–2417. doi: 10.1101/gad.1230704.
55. Buxton P, Edwards C, Archer CW, Francis-West P. Growth/differentiation factor-5 (GDF-5) and skeletal development. *J Bone Joint Surg Am.* 2001;83-A Suppl 1(Pt 1):S23-30.
56. Settle SH Jr, Rountree RB, Sinha A, Thacker A, Higgins K, Kingsley DM. Multiple joint and skeletal patterning defects caused by single and double mutations in the mouse *Gdf6* and *Gdf5* genes. *Dev Biol.* 2003;254(1):116–30. doi: 10.1016/s0012-1606(02)00022-2.
57. Merino R, Rodriguez-Leon J, Macias D, Gañan Y, Economides AN, Hurle JM. The BMP antagonist Gremlin regulates outgrowth, chondrogenesis and programmed cell death in the developing limb. *Development.* 1999;126(23):5515–22. doi: 10.1242/dev.126.23.5515.
58. Sekine K, Ohuchi H, Fujiwara M, Yamasaki M, Yoshizawa T, Sato T, Yagishita N, Matsui D, Koga Y, Itoh N, Kato S. *Fgf10* is essential for limb and lung formation. *Nat Genet.* 1999;21:138–141. doi: 10.1038/5096.
59. Zhang C, Chang Y, Shu L, Chen Z. Pathogenesis of thoracic ossification of the ligamentum flavum. *Front Pharmacol.* 2024;15:1496297. doi: 10.3389/fphar.2024.1496297.
60. Siddiqui AU, Gurudiwan R, Siddiqui AT, Gupta P, Singh J. Putative Clinical Implications of Unilateral Ossified Sacrospinous Ligament. *J Health Allied Sci NU.* 2020;10(3):108–111. doi: 10.1055/s-0040-1716665.

61. Goddyn C, Passuti N, Leconte R, Redon H, Gouin F. Sciatic nerve compression related to ossification of the sacrospinous ligament secondary to pelvic balance abnormalities. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2009;95(8):645–648. doi: 10.1016/j.otsr.2009.08.005.
62. Chu R, Jiang Q, Chai S, Pang Z, Xu Y, Zhao X. Ossification of Bilateral Sacrotuberous Ligaments: Two Cases Report and Literature Review. *Orthop Surg.* 2024;16(6):1502–1507. doi: 10.1111/os.14062.
63. Prescher A. Anatomical observations of spurs of the tuber ischiadicum. *Surg Radiol Anat.* 1993;15(2):99–103. doi: 10.1007/BF01627612.
64. Agrons GA, Markowitz RI, Bronson WE. Three-dimensional CT diagnosis of myositis ossificans of the sacrospinous ligament. *Pediatr Radiol.* 1993;23(2):143–144. doi: 10.1007/BF02012410.
65. Arora J, Mehta V, Suri RK, Rath G. Unilateral partial ossification of sacrotuberous ligament: anatomico-radiological evaluation and clinical implications. *Rom J Morphol Embryol.* 2009;50(3):505–508.
66. Greenspan A, Norman A. The “Pelvic digit” -- an unusual developmental anomaly. *Skeletal Radiol.* 1982;9(2):118–122. doi: 10.1007/BF00360495.
67. Beyth S, Liebergall M, Mosheiff R. Myositis ossificans circumscripta of the sacrotuberous ligament: a case report and review of the literature. *J Orthop Trauma.* 2002;16(9):672–674. doi: 10.1097/00005131-200210000-00012.

8. Danksagung

9. Tabellarischer Lebenslauf