

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

Morphometrische Untersuchungen zum intrakraniellen Verlauf des
Nervus hypoglossus

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

Vorgelegt von

Julian Niklas Kläger
aus Balingen

Mainz, 2026

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 17. März 2026

Nachnutzungslizenz: CC-BY-ND-4.0

Den Körperspenderinnen und Körperspendern.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden publiziert:

Klaeger JN, Schmeisser MJ, Schumann S (2025) Anatomical variability of the hypoglossal dural pori and canal: double hypoglossal dural porus is the main anatomical configuration in the German population. *Surg Radiol Anat.* 48(1):12. doi: 10.1007/s00276-025-03775-w.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Makroskopische Anatomie des Nervus Hypoglossus	1
1.2 Duradurchtritt und Hypoglossuskanal	3
1.3 Entwicklung von Nerv und Kanal	5
1.4 Klinischer Kontext	7
2 Zielsetzung	9
3 Material und Methoden	10
3.1 Humanes Gewebe	10
3.2 Statistische Auswertung	12
3.3 Visualisierung von Abbildungen und Tabellen	12
3.4 Instrumentarium und Verbrauchsmaterialien	12
4 Ergebnisse	13
4.1 Hypoglossaler Duradurchtritt	13
4.2 Canalis nervi hypoglossi	16
4.3 Triplikatur des Canalis nervi hypoglossi	17
5 Diskussion	24
5.1 Entwicklung des Canalis nervi hypoglossi	24
5.2 Duplikatur des Canalis nervi hypoglossi	25
5.3 Sekundäre Ossifikation als Einflussfaktor auf die Prävalenz von Kanalduplikaturen 26	
5.4 Genetische und populationsspezifische Determinanten	29
5.5 Lateralität hyperostotischer Schädelmerkmale	31
5.6 Biologisches Geschlecht und hypoglossale Brückenbildung	33
5.7 Pathologische Exostosen als möglicher Störfaktor bei der Auszählung	38
5.8 Triplikaturen des Hypoglossuskanals – ein seltener Befund	39
5.9 Der Hypoglossuskanal im Kontext menschlicher Sprachevolution	40

6	Zusammenfassung.....	44
7	Literaturverzeichnis	45
8	Danksagung.....	51
9	Tabellarischer Lebenslauf	52

Abkürzungsverzeichnis

Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
C1	Nervus cervicalis 1, Zervikalnerv 1
C2	Nervus cervicalis 2, Zervikalnerv 2
C3	Nervus cervicalis 3, Zervikalnerv 3
dAVF	Durale arterivenöse Fistel
FM	Foramen magnum
M	Mittelwert
M.	Musculus
Max	Maximum
Min	Minimum
n	Anzahl
N.	Nervus
Nn.	Nervi
Ncl.	Nucleus
p	p-Wert
PICA	Posterior inferior cerebellar artery
Q1	Quartil 1
Q3	Quartil 3
r	Korrelationskoeffizient (Pearson)
Rr.	Rami
röm.	römisch
SD / ±	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
vgl.	vergleiche, zum Vergleich
VI	6. Hirnnerv, Nervus abducens
VII	7. Hirnnerv, Nervus facialis
VIII	8. Hirnnerv, Nervus vestibulocochlearis
IX	9. Hirnnerv, Nervus glossopharyngeus
X	10. Hirnnerv, Nervus vagus
XI	11. Hirnnerv, Nervus accessorius
XII	12. Hirnnerv, Nervus hypoglossus
zit.	zitiert, zitiertes Werk, zitiert nach

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verzweigungsschema und extrakranieller Verlauf des N. hypoglossus.....	2
Abbildung 2: Lage und intrazerebraler Verlauf der Hypoglossusfasern.....	2
Abbildung 3: Intrakranieller Situs, Schädelbasis in der Ansicht von dorsal.....	4
Abbildung 4: Schematische Darstellung der sich entwickelnden Schädelbasis.....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung anatomischer Varianten des Duradurchtritts.....	11
Abbildung 6: Typenübersicht anatomischer Varianten des Hypoglossuskanals in schematischer Darstellung	11
Abbildung 7: Duraler und ossärer Durchtritt des N. hypoglossus aus dem Schädelinneren ..	14
Abbildung 8: Absolute Häufigkeit duraler Durchtrittsvarianten	15
Abbildung 9: Entfernung zwischen zwei Durapori bei doppeltem Duradurchtritt.....	15
Abbildung 10: Absolute Häufigkeit knöcherner Durchtrittsvarianten.....	18
Abbildung 11: Entfernung zwischen zwei Knochenöffnungen bei Vorliegen einer Kanalduplikatur.....	18
Abbildung 12: Triplikatur eines linken Canalis nervi hypoglossi	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht erfasste Durchtrittsvarianten und Messdaten	21
Tabelle 2: Prävalenz und Messdaten duraler Durchtrittsvarianten des N. hypoglossus	23
Tabelle 3: Prävalenz und Messdaten knöcherner Durchtrittsvarianten des N. hypoglossus..	23

1 Einleitung

1.1 Makroskopische Anatomie des Nervus Hypoglossus

Der Nervus hypoglossus ist der zwölfte Hirnnerv und führt somatomotorische Nervenfasern. In seinem Verlauf geht er Verbindungen zu anderen Nerven ein (Abb. 1), etwa dem N. vagus, Ganglion cervicale superius, N. lingualis und den Rr. ventrales C1, C2 und C3 (Benninghoff und Drenckhahn, 2004; Lang und Lanz, 1985; Neuhuber und Mysicka, 1980; Standring, 2016). Die Axone des Nervus hypoglossus entspringen dem Hypoglossuskern (Ncl. nervi hypoglossi) im Hirnstamm (Truncus encephali) und innervieren mit Ausnahme des M. palatoglossus alle inneren (intrinsischen) und äußeren (extrinsischen) Muskeln der Zunge. Die Kernregion ist beidseits ventrolateral des Zentralkanals (Canalis centralis) im Tegmentum des verlängerten Marks (Medulla oblongata) gelegen (Abb. 2). Sie zeigt sich als eine etwa 2 cm lange Erhebung am Boden der Rautengrube, dem Trigonum nervi hypoglossi. Der Ncl. nervi hypoglossi weist eine somatotope Organisation auf. Dorsal und dorsolateral gelegene Neuronen innervieren überwiegend Zungenretraktoren, während ventral und ventromedial lokalisierte Neurone die Zungenprotraktoren steuern (Iaconetta *et al.*, 2018; Standring, 2016). Durch Bewegung und Formung der Zunge nimmt der zwölfte Hirnnerv eine Schlüsselrolle bei der Artikulation von Lauten, dem Kauakt und des Schluckvorgangs ein.

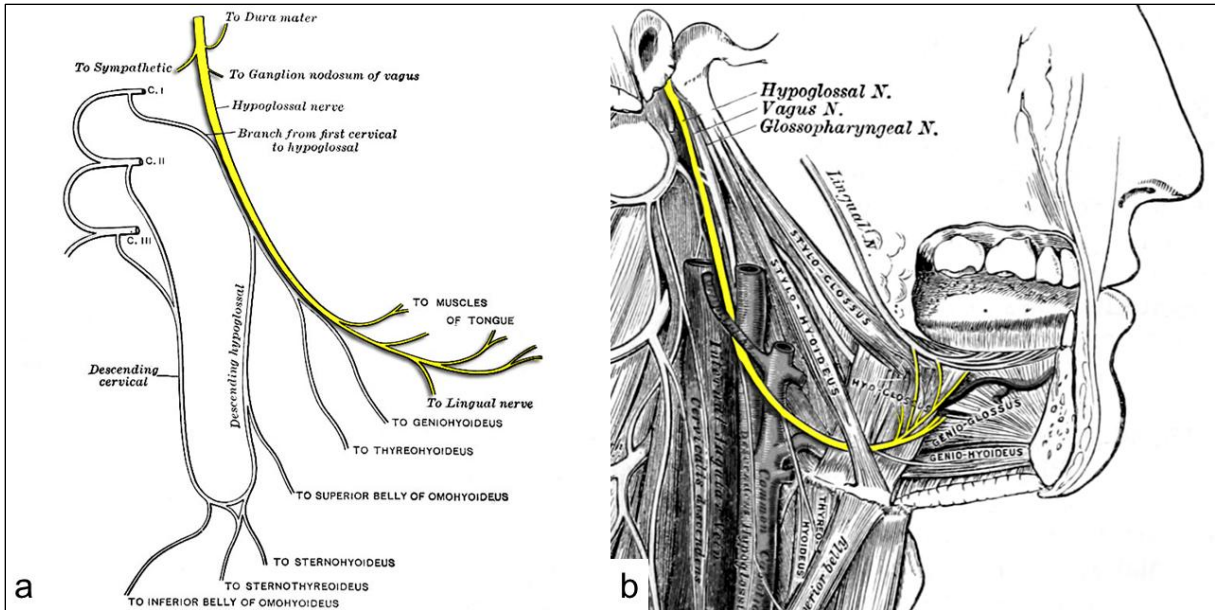


Abbildung 1: Verzweigungsschema und extrakranieller Verlauf des N. hypoglossus

Zur besseren Übersicht wurden Anteile des N. hypoglossus gelb hervorgehoben.

Dargestellt sind (a) das Verzweigungsschema und (b) der extrakranielle Verlauf des N. hypoglossus mit seinen Verbindungen zu benachbarten Nerven (modifiziert nach Gray und Lewis, 1918).

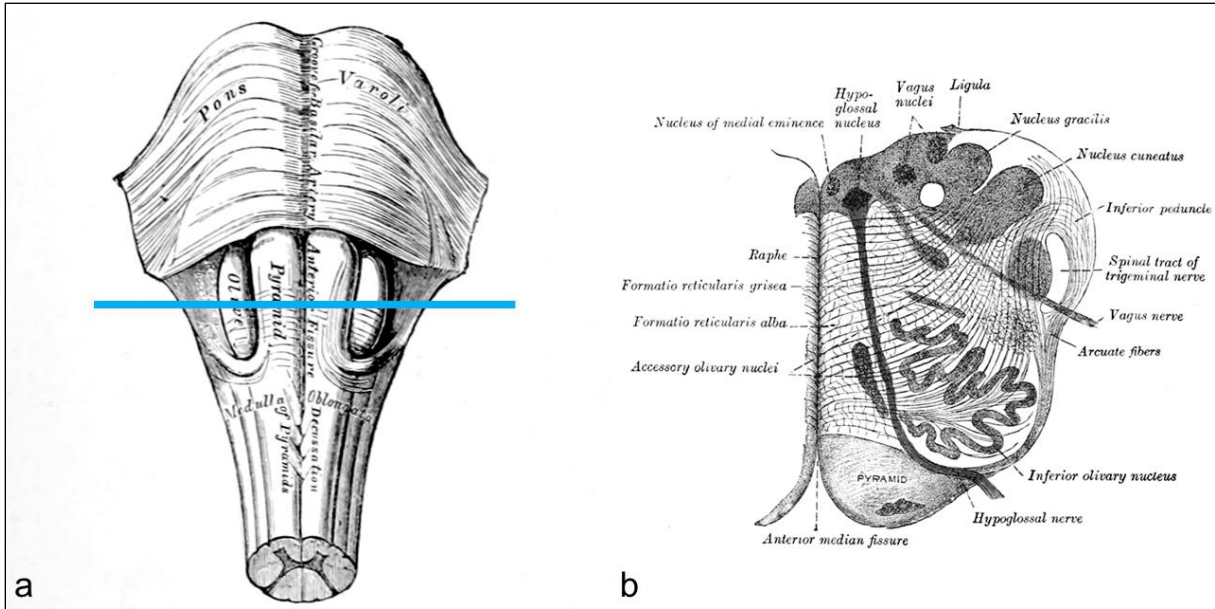


Abbildung 2: Lage und intrazerebraler Verlauf der Hypoglossusfasern

Ventrale Ansicht von Medulla oblongata und Pons (a) mit markierter Schnittebene (blaue Linie) auf mittlerer Höhe der Olive. Im korrespondierenden Transversalschnitt (b) ist der Verlauf der hypoglossalen Nervenfasern von der dorsal, paramedian gelegenen Kernregion (Ncl. nervi hypoglossi) nach ventral dargestellt, wo sie die Medulla oblongata in Form von 10–15 Wurzelfasern zwischen Olive und Pyramide im Sulcus präolivaris verlassen (modifiziert nach Gray und Lewis, 1918).

1.2 Duradurchtritt und Hypoglossuskanal

Ausgehend vom Kerngebiet ziehen die Hypoglossusfasern nach ventral, durchqueren die *Formatio reticularis* und vereinigen sich beidseits zu etwa 10–15 myelinisierten Wurzelfasern (*Fila radicularia*). Diese verlassen die *Medulla oblongata* zwischen Pyramide und Olive (Abb. 2) im *Sulcus preolivaris* (Iaconetta *et al.*, 2018; Standring, 2016). Im Verlauf vereinigen sich die Wurzelfasern variabel zu 1–3, typischerweise aber zu 2 Wurzelbündeln. Die Hirnhäute bilden einen oder mehrere trichterartige Durchgänge in Richtung der inneren Öffnung des Hypoglossuskanals, die den Austritt aus dem Schädelinneren ermöglichen (Abb. 3). Schützend umhüllen Dura- und Arachnoidealscheiden den Nerv und begleiten ihn für einen Teil seines Verlaufs (Iaconetta *et al.*, 2018; Lang und Hornung, 1993; Lang und Lanz, 1985). Darüber hinaus kleidet die *Dura mater* die *Canales nervi hypoglossi* aus und geht an der äußeren Öffnung in das straffe *Pericranium* über (Lang und Lanz, 1985).

Der *Canalis nervi hypoglossi* ist ein paariger Knochenkanal der Schädelbasis (*Basis cranii*). Die inneren Öffnungen befinden sich in der Umrandung des *Foramen magnum*, symmetrisch auf etwa 10 und 2 Uhr (Abb. 3). Der Kanal verläuft in anterolateraler Richtung durch die *Pars lateralis ossis occipitalis* und bildet dabei mit der *Sagittalebene* einen Winkel von durchschnittlich 45° (Lang und Lanz, 1985). Inferior grenzen die *Okzipitalkondylen*, superolateral der *Processus jugularis* und superomedial der *Clivus* an den Kanal. Neben dem *Foramen magnum* (medial) steht der Hypoglossuskanal in enger topografischer Beziehung zum *Foramen jugulare* (lateral) und dem inkonstant vorkommenden *Canalis condylaris* (posterior). Die äußere Öffnung liegt oberhalb des *Condylus occipitalis* und befindet sich in etwa auf Höhe des Übergangs zwischen dem vorderen ersten und zweiten Drittel desselben (Lang und Lanz, 1985; Standring, 2016).

Wie von Gisel beschrieben (1955) verläuft der *N. hypoglossus* innerhalb des Knochenkanals umgeben von einem venösen Plexus (*Plexus venosus canalis hypoglossalis*), in welchen er nach Iaconetta *et al.* (2018) auf voller Strecke eingebettet ist. Dieser zwischen Durascheide und duraler Knochenauskleidung lokalisierte Plexus steht in Verbindung mit dem *Sinus occipitalis*, dem *Sinus petrosus inferior*, der *Vena jugularis interna*, der *Vena emissaria condylaris* sowie dem *Plexus venosus vertebralis externus* (Gisel, 1956; Lang und Lanz, 1985). Neben Nerv und Venengeflecht findet sich zudem in etwa 45 % der Fälle nach Lang und Hornung (1993) ein Zweig der *Arteria pharyngea ascendens* im Kanal, welcher lokal zur Blutversorgung des Knochens und der *Dura mater* beiträgt. Auch findet sich vereinzelt eine persistierende Hypoglossusarterie (*A. hypoglossa persistens*) im *Canalis nervi hypoglossi* (Gerlach *et al.*, 1962). An der äußeren Kanalpforte präsentiert sich schließlich ein meist unifaszikulärer peripherer Nerv (Lang und Hornung, 1993; Lang und Lanz, 1985).

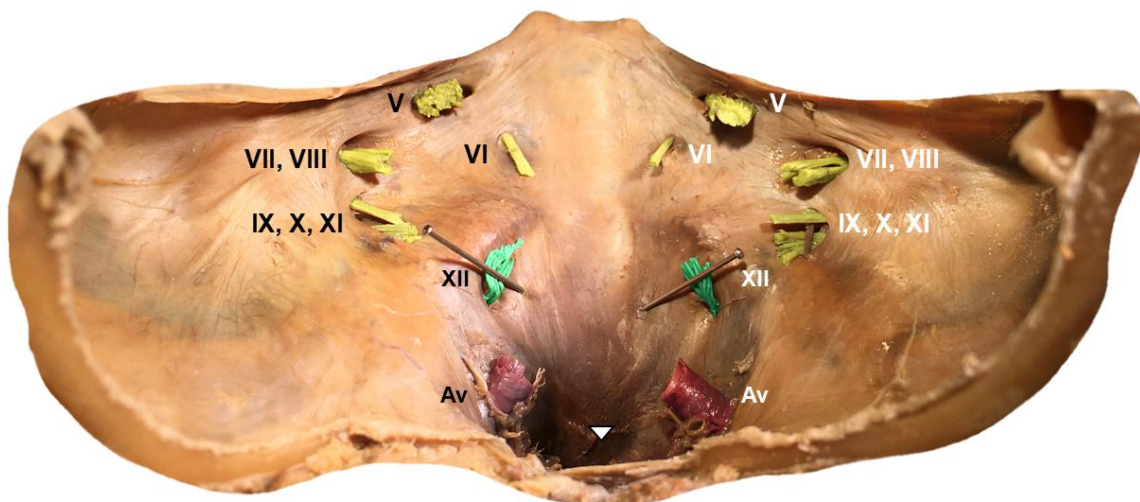


Abbildung 3: Intrakranieller Situs, Schädelbasis in der Ansicht von dorsal

Darstellung der Fossa cranii posterior mit Nn. hypoglossi (grün) und ihrer Lagebeziehung zu benachbarten Strukturen. Sichtbar sind trichterartig konfigurierte Duradurchtritte als Austrittswege der Hirnnerven (röm. Nummerierung).

Zur Verdeutlichung wurden relevante Strukturen farbcodiert: N. hypoglossus in Grün, übrige Hirnnerven in Gelb, Aa. vertebrales in Rot.

Pfeilspitze weiß	= Foramen magnum
Av	= Aa. vertebrales
V	= N. trigeminus
VI	= N. abducens
VII, VIII	= N. facialis, N. vestibulocochlearis
IX, X, XI	= N. glossopharyngeus, N. vagus, N. accessorius
XII	= N. hypoglossus

1.3 Entwicklung von Nerv und Kanal

Aus evolutionsbiologischer Perspektive kann der Nervus hypoglossus als kranialisierter Spinalnerv betrachtet werden (Starck, 1982). Seine Kernregion geht aus den somatoefferenten Anteilen der Grundplatten hervor, analog zur Entwicklung der motorischen Vorderhörner auf Rückenmarksniveau. Während seiner Entwicklung entsteht der XII. Hirnnerv aus der Fusion von drei oder vier okzipitalen Vorderwurzeln, welche meist Mitte des 2. Monats ihre Hinterwurzeln einschließlich der Spinalganglien verlieren (Lang und Lanz, 1985; O’Rahilly und Müller, 1984). In seltenen Fällen können beim Menschen persistierende dorsale Wurzeln und deren zugehörige Ganglien (Froiep-Ganglion) beobachtet werden, welche vor allem mit den kaudalen Hypoglossuswurzeln assoziiert sind (Pearson, 1939).

Das Os occipitale geht aus dem paraxialen Mesoderm hervor. Die großen Hirnnerven (u.a. Nervus hypoglossus) sind dabei bereits ausgebildet, noch bevor sich das Mesenchym zur Bildung des Chondrokraniums verdichtet (Standring, 2016). Um den 20. Tag (Carnegie Stadium 9) lassen sich 1–3 okzipitale Somiten identifizieren (Abb. 4), deren Sklerotome im Verlauf unter anderem den okzipitalen Anteil des Chondrocraniums ausbilden (O’Rahilly und Müller, 1984). Um die 7. Embryonalwoche breiten sich die zentralen Anteile der okzipitalen Sklerotome, welche die Chorda dorsalis umgeben, zu einer flachen Platte aus und bilden die Pars basilaris des Os occipitale (basiokzipitale Komponente). Seitlich davon entwickeln sich aus den Sklerotomen der Somiten 3 und 4 die Partes laterales (exokzipitale Komponente), welche das Hinterhirn von beiden Seiten umwachsen. Auf diese Weise bilden sich bogenförmige Strukturen, die Okzipitalbögen, welche auf Höhe der Wirbelsäule den Wirbelbögen entsprechen (Standring, 2016). Im weiteren Verlauf fusioniert die knorpelige Anlage des Os occipitale mit der Cartilago parachordalis, einer Knorpelplatte am oberen Ende der Chorda dorsalis. Dabei bleiben die bereits vorhandenen Fasern des N. hypoglossus ausgespart – die Canales nervi hypoglossi entstehen (Lang und Lanz, 1985; Standring, 2016).

Wie O’Rahilly und Müller (1984) anhand einer Untersuchung von 105 menschlichen Embryonen zeigen konnten, steht die Gestalt des Canalis nervi hypoglossi beim Neugeborenen in engem Zusammenhang mit dem Prozess der okzipitalen Chondrifizierung im Entwicklungsstadium eines etwa 17 mm großen Embryos (entsprechend Carnegie-Stadium 18/19) sowie mit der räumlichen Organisation der hypoglossalen Wurzelbündel zu diesem Zeitpunkt. Das Auftreten und Ausmaß zunächst knorpeliger, in der Folge knöcherner Brückenbildungen, aus denen zwei- oder dreigeteilte Hypoglossuskanäle hervorgehen können, lässt sich als Ausdruck der variationsreichen Dynamik paralleler Entwicklungsprozesse zwischen den neurovaskulären und chondralen Strukturen im Bereich des sich formenden Os occipitale verstehen (O’Rahilly und Müller, 1984).

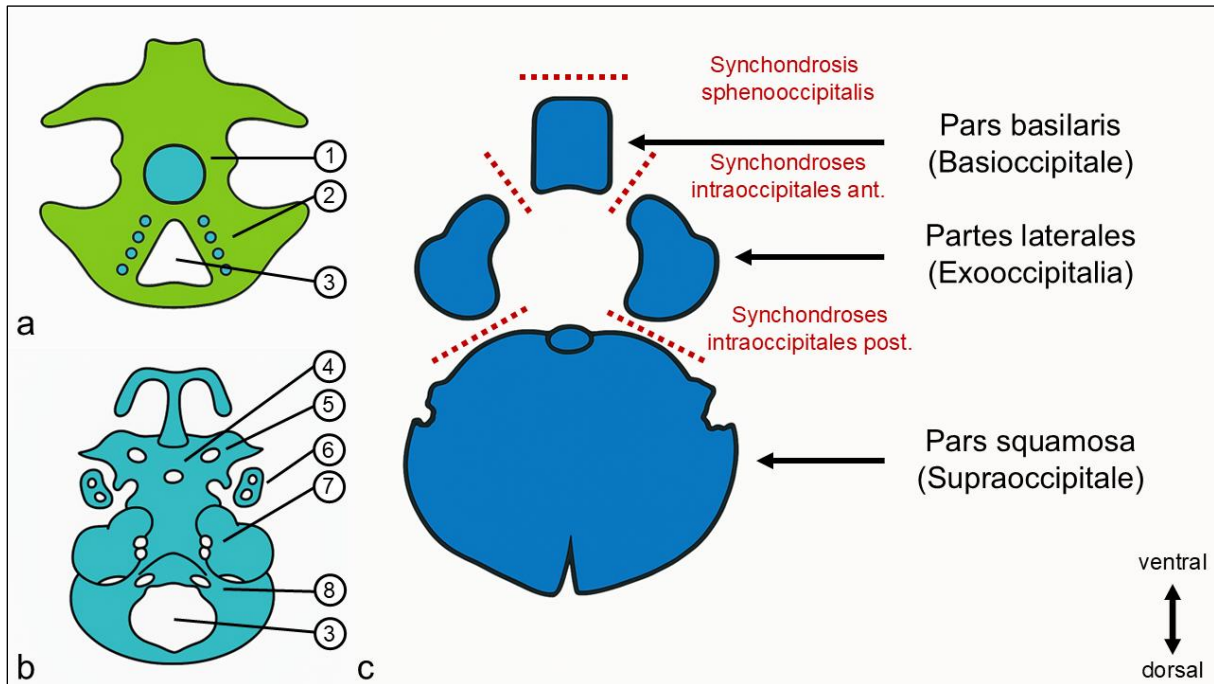


Abbildung 4: Schematische Darstellung der sich entwickelnden Schädelbasis

Schematisch werden die strukturellen Veränderungen der Schädelbasis während wesentlicher embryonaler und fetaler Entwicklungsstadien in basaler Ansicht gezeigt.

Nummerierte Strukturen:

(1) Cartilago parachordalis; (2) Occipitale Sklerotome; (3) Foramen magnum; (4) Rathke-Tasche; (5) Canalis opticus; (6) Foramen rotundum und ovale; (7) Porus acusticus internus; (8) Canalis nervi hypoglossi.

(a) Schnitt durch die mesenchymale Schädelbasis eines etwa fünf Wochen alten Embryos. Diese frühe mesenchymale Struktur stellt die erste erkennbare Entwicklungsform des Schädels dar und entsteht etwa in der vierten Embryonalwoche. Sie umgibt das sich entwickelnde Gehirn und differenziert sich neben den Meningen unter anderem zu Chondroblasten, welche ab der siebten Embryonalwoche die Chondrifizierung der Schädelbasis einleiten (Som und Naidich, 2013). Zur besseren Übersicht wurden lediglich jene Strukturen dargestellt, die für die Entwicklung des Os occipitale relevant sind.

(b) Chondrokranium eines etwa neun Wochen alten Fetus. Die zentralen Sklerotome der Occipitalsomiten sind zuvor mit der Cartilago parachordalis verschmolzen und haben die Pars basilaris ossis occipitalis ausgebildet. Ebenso sind aus den Sklerotomen der Somiten 3 und 4 die Partes laterales ossis occipitalis hervorgegangen, welche das Rautenhirn (Rhombencephalon) umwuchsen (Som und Naidich, 2013; Standring, 2016). Im gezeigten Entwicklungsstadium ist die Schädelbasis vollständig chondrifiziert.

(c) Schemenhafte Ansicht des Os occipitale eines Fetus entsprechend der 25. Schwangerschaftswoche. Die Pars squamosa, die Partes laterales sowie die Pars basilaris ossis occipitalis zeigen sich bereits deutlich ossifiziert und sind als getrennte Knochenanlagen klar voneinander abgrenzbar. Ihre ossäre Verschmelzung erfolgt in der Regel bis zum vierten Lebensjahr (Som und Naidich, 2013).

1.4 Klinischer Kontext

Im Vergleich zu den übrigen Hirnnerven weisen Läsionen im Bereich des N. hypoglossus eine geringere Prävalenz auf und sind in der Regel von benigner Dignität. Zu den möglichen Pathologien gehören hypoglossale Schwannome, Meningeome der hinteren Schädelgrube sowie durale arteriovenöse Fisteln (dAVF). Zu den selteneren Ursachen hypoglossaler Affektionen zählen Malignome, die in vielen Fällen ihren Ursprung direkt oder indirekt in der Clivusregion haben. Hierzu zählen insbesondere Chordome, Metastasen oder nasopharyngeale Tumoren, welche infiltrativ in die Schädelbasis übergreifen.

Treten intrakranielle Läsionen des Nervus hypoglossus auf, so manifestieren sich diese häufig in Kombination mit weiteren Hirnnervenausfällen. Ein Beispiel hierfür ist das Godtfredsen-Syndrom (Godtfredsen, 1947; Wai *et al.*, 2022). Dieses seltene Krankheitsbild ist gekennzeichnet durch das gemeinsame Auftreten einer Abducens- (VI. Hirnnerv) und Hypoglossusparese (XII. Hirnnerv) infolge einer clivalen Raumforderung. Aufgrund der charakteristischen Symptom-Konstellation (Diplopie, welche sich bei Blickrichtung zur betroffenen Seite intensiviert, sowie Zungenabweichung zur Seite der Schädigung) ermöglicht das Syndrom eine anatomische Lokalisation der zugrunde liegenden Pathologie.

Einseitig auftretende Paresen des N. hypoglossus können in vielen Fällen durch die kontralaterale Zungenmuskulatur kompensiert werden, sodass klinische Beeinträchtigungen oft nur gering ausgeprägt sind. Demgegenüber führen beidseitige Paresen dieses Hirnnervs zu einer erheblich eingeschränkten Zungenbeweglichkeit, was ausgeprägte Beeinträchtigungen des Schluckvorgangs und der Artikulation nach sich ziehen kann (Węgiel *et al.*, 2024).

Die Indikationsstellung zur chirurgischen Therapie entsprechender Entitäten orientiert sich primär an Art, Größe und Lokalisation der zugrunde liegenden Pathologie, wird jedoch wesentlich durch morphologische Variationen des Nervus hypoglossus beeinflusst (Schipper *et al.*, 2022). Im Gegensatz zu den Anfängen der Schädelbasischirurgie konnten zunehmend weniger invasive Verfahren etabliert werden („Keyhole-Konzept“) (Schipper *et al.*, 2022). Ein häufig angewandter Zugangsweg ist hierbei der transkondyläre „Far-Lateral-Approach“. Zentraler Schritt dieses Zugangs ist das Durchbohren der Okzipitalkondyle, wodurch der Hypoglossuskanal und seine enthaltenen Strukturen verletzt werden können (Wen *et al.*, 1997). Bei der anschließenden Präparation ist eine eindeutige Identifikation der hypoglossalen Nervenwurzeln erforderlich, insbesondere in Abgrenzung zu benachbarten Hirnnerven (Bhuller *et al.*, 1998) und zur Arteria cerebelli inferior posterior („PICA“), welche eine Durchkreuzung der hypoglossalen Wurzelbündel aufweisen und mit einer bindegewebigen Trennschicht verwechselt werden kann (Bademci und Yasargil, 2006). Hierdurch kommt der

Kenntnis hypoglossaler Varianten und ihrer potenziell zugrunde liegenden Determinanten im Kontext neurochirurgischer Eingriffe besondere Relevanz zu.

2 Zielsetzung

Das Auftreten duraler und knöcherner Durchtrittsvarianten der Hypoglossusfasern beim Austritt aus dem Schädel ist ein in der anatomischen Literatur vielfach beschriebenes Phänomen (Tubbs *et al.*, 2016). Die Häufigkeit anatomischer Variationen in Deutschland ist bislang jedoch nur unzureichend erforscht.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, anhand der Präparation von 101 Schädelhälften das Vorkommen entsprechender Durchtrittsvarianten des Nervus hypoglossus systematisch zu erfassen, detaillierte Vermessungen vorzunehmen und die Häufigkeit der Varianten in einer deutschen Population in Abhängigkeit von Alter und Körperseite zu bestimmen.

3 Material und Methoden

3.1 Humanes Gewebe

Die vorliegende Studie wurde an formaldehydfixierten Schädelbasen aus der anatomischen Sammlung des Instituts für Anatomie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz durchgeführt. Insgesamt umfasst die Auswahl 72 Feuchtpräparate (n = 101 Schädelbassiseiten) anonymisierter Körperspenderinnen und Körperspender, die zum Zeitpunkt ihres Todes das 60. Lebensjahr erreicht oder überschritten hatten. Aufgrund der Anonymisierung sind Angaben zu Alter, Geschlecht und Krankengeschichte nicht bekannt. Alle Präparate stammen von Körperspenderinnen und Körperspendern deutscher Ethnie, die ihren Körper zu Lebzeiten freiwillig zu Zwecken der medizinischen Forschung und Ausbildung zur Verfügung gestellt hatten.

Die Studie folgt den Bestimmungen der Helsinki-Deklaration von 1964 und ihren späteren Ergänzungen. Ein positives Votum wurde unter der Antragsnummer 2023-17245 durch die Ethik-Kommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz erteilt.

Makroskopisch untersucht wurden 52 rechte und 49 linke Schädelhälften, wobei der Schwerpunkt zunächst auf der Identifikation anatomischer Varianten des duralen Durchtritts der hypoglossalen Nervenwurzelbündel lag (Abb. 5). Für die Messungen wurde eine Schiebelehre verwendet. Bei Vorliegen mehrerer Durapori wurde der Abstand jeweils an der breitesten Stelle der meningealen Brücken bestimmt.

Der weitere Verlauf des N. hypoglossus wurde im Anschluss durch gezielte anatomische Präparation dargestellt. Zu diesem Zweck wurde die Dura mater vorsichtig fensterförmig abgelöst, um sowohl die anatomischen Varianten des Hypoglossuskanals (Abb. 6) als auch die Organisation der hypoglossalen Wurzelbündel im entsprechenden Verlaufsabschnitt systematisch zu erfassen. Bei Nachweis einer vollständig geschlossenen Knochenbrücke (Typ 5) erfolgte eine Messung der Breite der Knochenbrücke im mittleren Drittel. Im Falle der einfachen Kanalvariante (Typ 1) oder einer inkompletten Septierung (Typ 2–4) wurde die beobachtete Kanalvariante standardisiert dokumentiert.

Für die Auszählung der duralen und ossären Durchtrittsvarianten des Nervus hypoglossus konnten alle Kopfhälften (n = 101) miteinbezogen werden. Weiterführende histologische Analysen waren aufgrund der langen Lagerungszeit der untersuchten Präparate nicht möglich.

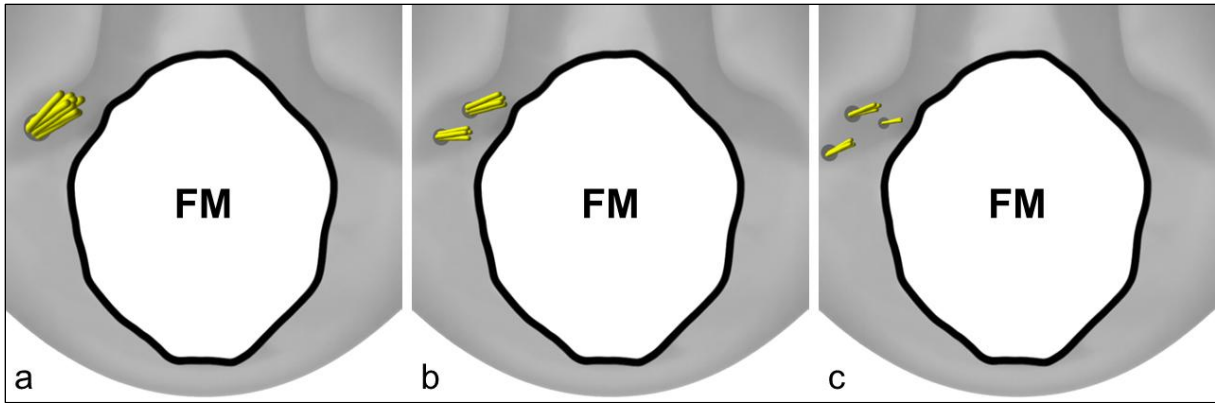


Abbildung 5: Schematische Darstellung anatomischer Varianten des Duradurchtritts

a: Hypoglossusdurchtritt durch einen einzelnen Porus. b: Variante mit zwei getrennten duralen Pori für je ein hypoglossales Wurzelbündel. c: Seltene Konfiguration mit drei separaten duralen Pori, durch welche vollständig voneinander getrennte Bündel des N. hypoglossus ziehen.

FM = Foramen magnum. Ansicht von endokraniel.

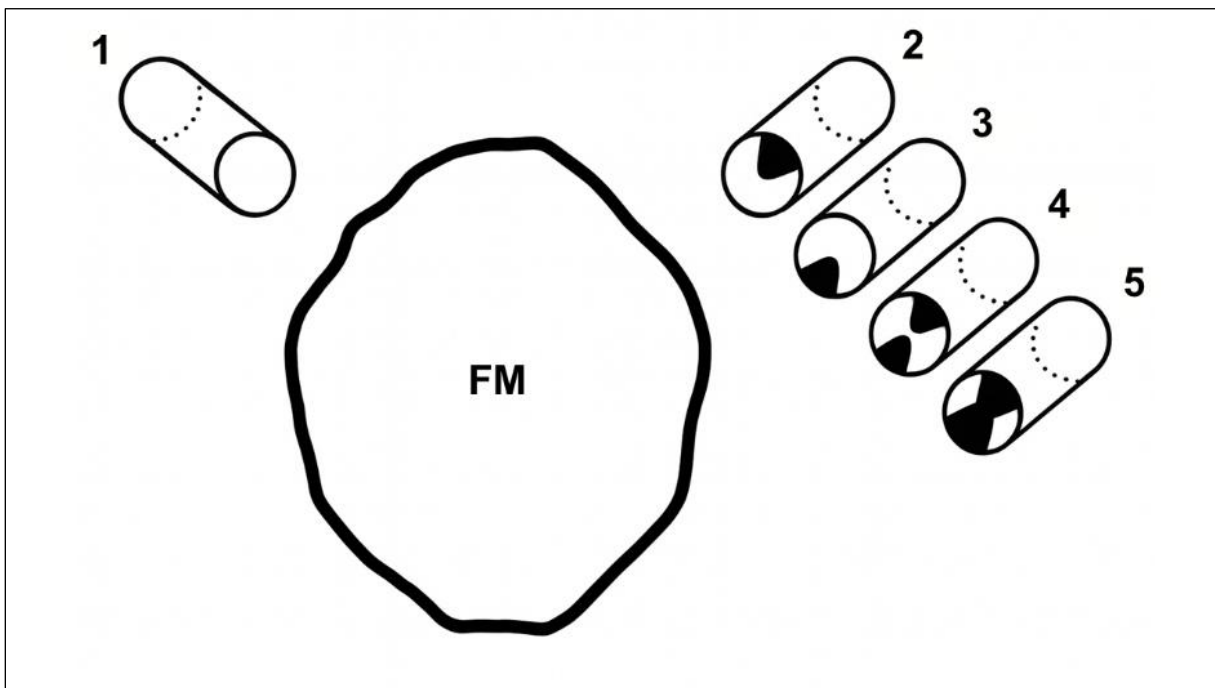


Abbildung 6: Typenübersicht anatomischer Varianten des Hypoglossuskanals in schematischer Darstellung

Linke Seite: Typ 1 (einfacher Kanal).

Rechte Seite, von oben nach unten: Typ 2 (Kanal mit einer Exostose am oberen Rand = obere Lingula), Typ 3 (Kanal mit einer Exostose am unteren Rand = untere Lingula), Typ 4 (Kanal mit sowohl einer oberen als auch einer unteren Lingula) und Typ 5 (Kanal mit einer vollständigen knöchernen Brücke).

FM = Foramen magnum.

3.2 Statistische Auswertung

Die Statistische Auswertung erfolgte mittels SPSS Statistics (Version 29, IBM Corp., Armonk, NY, USA), numiqo (Statistics Calculator, numiqo e.U., Graz, Austria) und Microsoft Excel (Microsoft 365, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Es wurden deskriptive Statistiken (absolute Häufigkeiten, Mittelwerte, Standardabweichungen) berechnet. Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen kontinuierlichen Variablen kam die Pearson-Korrelation zur Anwendung. Unterschiede zwischen unabhängigen Stichproben (Seitenvergleiche) wurden mit dem Chi-Quadrat-Test geprüft. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

3.3 Visualisierung von Abbildungen und Tabellen

Für die Erstellung und Bearbeitung von Abbildungen und Tabellen wurden Adobe Photoshop CS2 (Version 9.0, Adobe Inc., San José, CA, USA), CorelDRAW Graphics Suite (Version 15.2, Corel Corporation, Ottawa, ON, Canada) und Microsoft Excel (Microsoft 365, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) verwendet. Statistische Visualisierungen und Diagramme wurden ergänzend mit numiqo (Statistics Calculator, numiqo e.U., Graz, Austria) erstellt.

3.4 Instrumentarium und Verbrauchsmaterialien

- Messschieber nach DIN 862 (Messbereich 0–150 mm, Genauigkeit $\pm 0,02$ mm), Mitutoyo, Kawasaki (JPN)
- Einmalskalpelle, Servoprax, Wesel
- Anatomische Pinzette, Servoprax, Wesel
- Splitterpinzette, Servoprax, Wesel

4 Ergebnisse

4.1 Hypoglossaler Duradurchtritt

Die Auswertung der untersuchten Präparate ergab, dass die kraniale Dura in 65,3 % (n = 66) der Fälle und damit am häufigsten durch zwei vollständig voneinander getrennte Bündel des N. hypoglossus perforiert wird (Abb. 5; 7). Als zweithäufigste Variante ließ sich der einfache Durchtritt nachweisen, welcher mit einer Häufigkeit von 32,7 % (n = 33) beobachtet wurde. Der hypoglossale Duradurchtritt in Form von drei klar voneinander abgrenzbaren Pori stellte mit 2 % (n = 2) die seltenste Variante dar. Signifikante Unterschiede zwischen der rechten und der linken Seite konnten nicht festgestellt werden (Abb. 8).

Bei Vorliegen von zwei duralen Durchritten (n = 66) ergab sich zwischen den beiden Öffnungen ein mittlerer Abstand von $4,7 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$, gemessen von rostral nach kaudal und stets an der breitesten Stelle (Abb. 9). Der größte gemessene Abstand betrug 8,7 mm, während der geringste Abstand 1,9 mm maß.

Eine Triplikatur des hypoglossalen Duradurchtritts konnte jeweils einmal an einer rechten und einmal an einer linken Schädelbasis beobachtet werden. Dabei lag der Abstand zwischen der oberen und mittleren Duraöffnung bei 2,8 mm (rechte Seite) bzw. 1,8 mm (linke Seite) und zwischen der mittleren und unteren Öffnung bei 2,1 mm (rechte Seite) bzw. 2,2 mm (linke Seite).

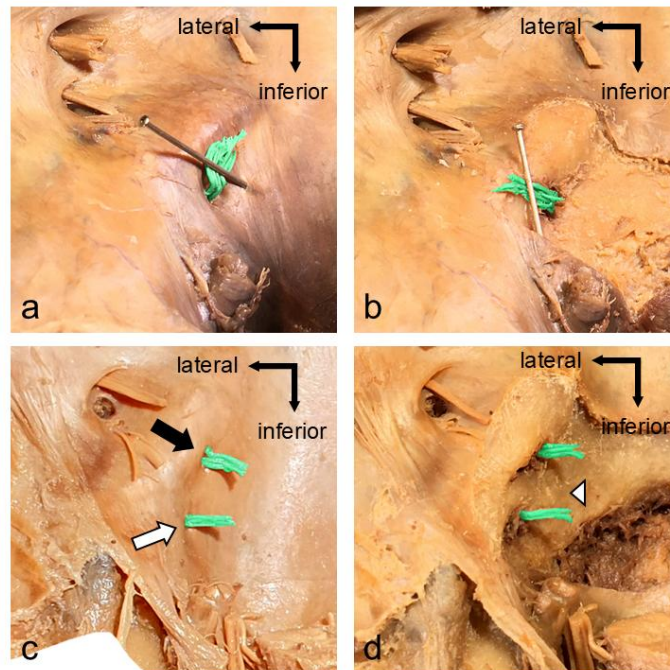


Abbildung 7: Duraler und ossärer Durchtritt des N. hypoglossus aus dem Schädelinneren

Zur besseren Darstellung wurden die Fasern des N. hypoglossus grün eingefärbt.

a: N. hypoglossus mit einzelner duraler Pori. b: Nach Entfernung der Dura mater kommt ein einfacher Canalis nervi hypoglossi zur Darstellung (Typ 1). c: Oberes (schwarzer Pfeil) und unteres (weißer Pfeil) Bündel des N. hypoglossus mit getrennten duralen Pori. d: Nach Entfernung der Dura mater wird eine vollständige knöcherne Brücke entsprechend Typ 5 (weiße Pfeilspitze) sichtbar.

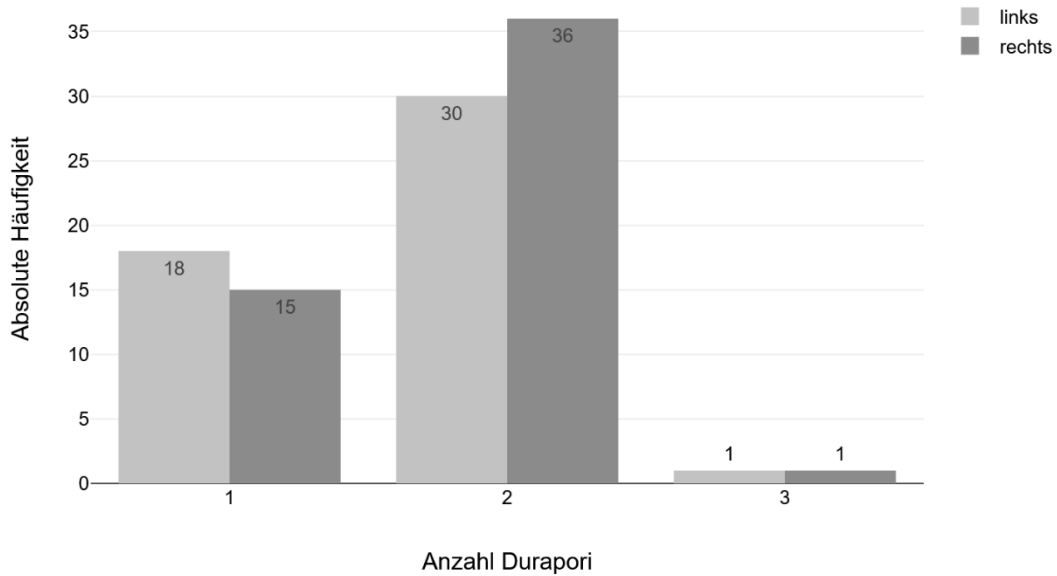


Abbildung 8: Absolute Häufigkeit duraler Durchtrittsvarianten

In den meisten Fällen (n = 66) erfolgte die Passage des N. hypoglossus durch zwei Durapori, gefolgt von der Variante mit einem einzelnen Porus (n = 33). Ein Durchtritt durch drei Pori wurde lediglich in zwei Fällen gefunden.

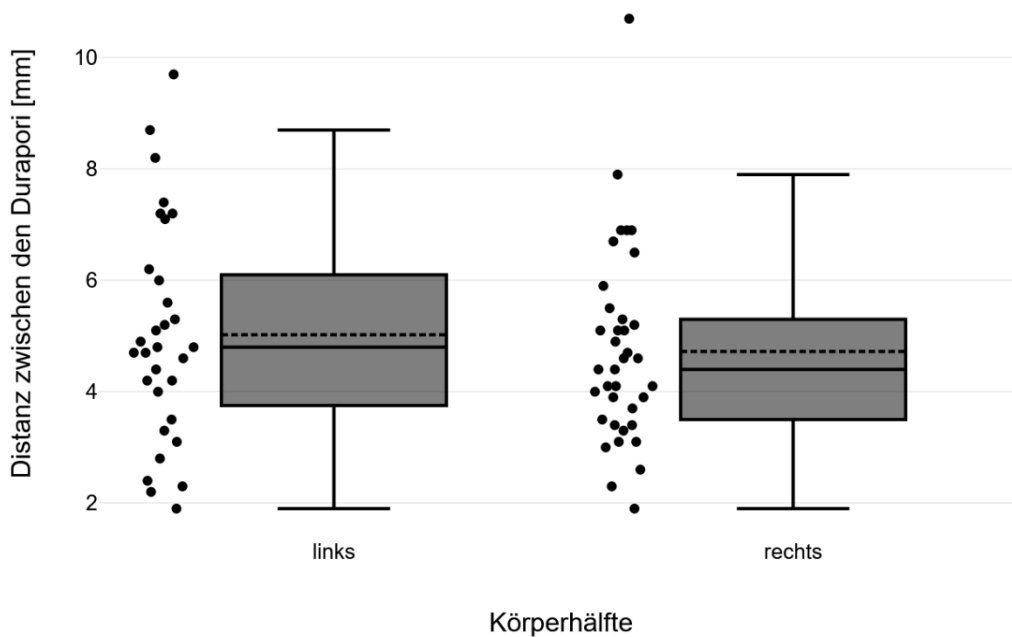


Abbildung 9: Entfernung zwischen zwei Durapori bei doppeltem Duradurchtritt

An den in der vorliegenden Studie untersuchten Körperspenden konnten folgende Werte ermittelt werden:

Links (n = 49): M = 5,02 mm, Q1 = 3,75 mm, Q3 = 6,1 mm, Min = 1,9 mm, Max = 9,7 mm.
 Rechts (n = 52): M = 4,72 mm, Q1 = 3,5 mm, Q3 = 5,3 mm, Min = 1,9 mm, Max = 10,7 mm.

4.2 Canalis nervi hypoglossi

Um die Varianten der knöchernen Durchtritte klassifizieren zu können, wurden 5 Typen der Konfiguration des Canalis nervi hypoglossi unterschieden (Abb. 6). Typ 1: Einfacher Kanal; Typ 2: Kanal mit einer Exostose am Oberrand (superiore Lingula); Typ 3: Kanal mit einer Exostose am Unterrand (inferiore Lingula); Typ 4: Kanal mit sowohl einer oberen als auch einer unteren Lingula; Typ 5: Kanal mit einer vollständig geschlossenen knöchernen Brücke.

Der Canalis nervi hypoglossi zeigte bei den in dieser Studie untersuchten Präparaten hauptsächlich drei verschiedene Konfigurationen (Abb. 10): In 34,7 % der Fälle fand sich ein einfacher Kanal, bei 31,7 % eine superiore Lingula und bei 26,7 % eine vollständig geschlossene Knochenbrücke. Eine inferiore Lingula oder die Kombination von inferiorer und superiorer Lingula trat hingegen lediglich in 4 % bzw. 3 % der Fälle auf. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der rechten und linken Schädelseite festgestellt werden.

Wenn vorhanden ($n = 27$), betrug die mittlere Breite der knöchernen Brücken $3,9 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$, mit einer minimalen Breite von $1,1 \text{ mm}$ und einer maximalen Breite von $7,1 \text{ mm}$ (Abb. 11). Auch bei den Distanzen der knöchernen Brücken ließen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Körperseite nachweisen.

In 24 Fällen konnte eine Kombination aus doppeltem Duradurchtritt und einer vollständig geschlossenen Knochenbrücke (Typ 5) festgestellt werden. Die Pearson-Korrelation zeigte eine hohe positive Korrelation zwischen der Distanz der Durapori und der Breite der Knochenbrücke. Diese Korrelation war statistisch signifikant ($r(22) = 0,64$; $p = 0,001$; $n = 24$).

4.3 Triplikatur des Canalis nervi hypoglossi

An einer linken Schädelbasis ließ sich ein dreifach angelegter Hypoglossuskanal unter einem gedoppelten Duradurchtritt feststellen (Abb. 12). Der Abstand zwischen den beiden Durapori betrug dabei 8,2 mm. Nach Entfernung der Dura mater konnte das inferiore Bündel durch eine vollständig von einer 6,3 mm breiten knöchernen Brücke getrennte, inferior gelegene Knochenöffnung verfolgt werden. Das superiore Faserbündel hingegen teilte sich vor Knochenniveau und verlief durch zwei separat ausgebildete superiore Öffnungen. Der superiore Durchtritt war dabei seinerseits vollständig durch ein vertikal orientiertes knöchernes Septum unterteilt, welches in der Breite 1,8 mm maß.

Eine vollständige Aufstellung der erfassten Messwerte ist den Tabellen 1–3 zu entnehmen.

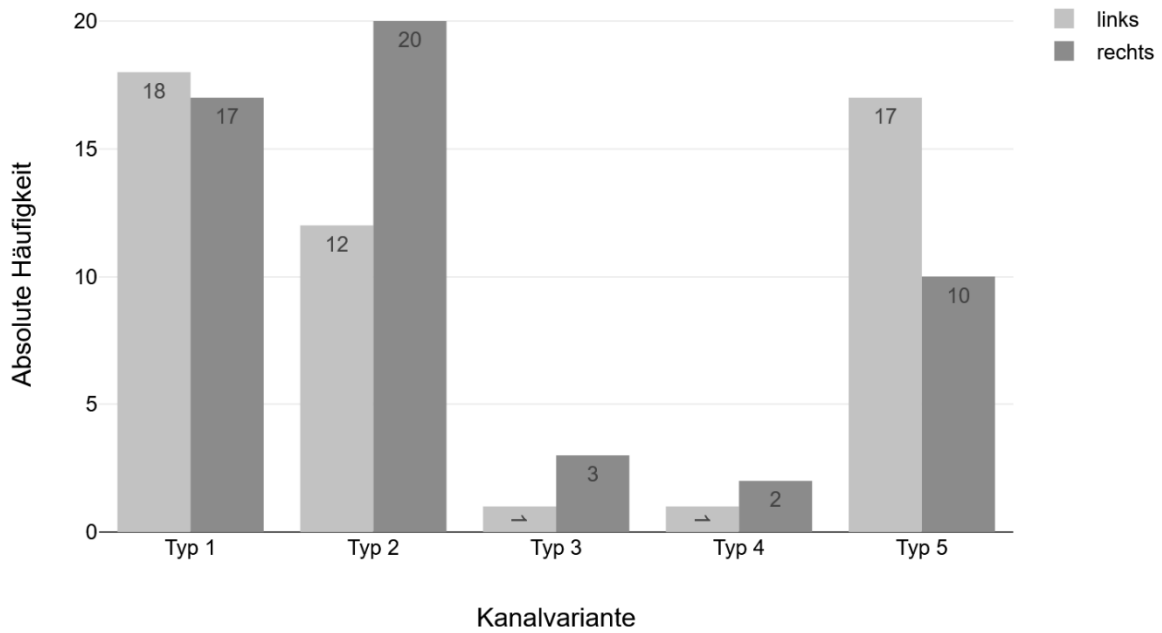


Abbildung 10: Absolute Häufigkeit knöcherner Durchtrittsvarianten

Der Hypoglossuskanal trat überwiegend als einfacher Kanal (Typ 1; n = 35), als Kanal mit superiorer Lingula (Typ 2; n = 32) oder als Kanal mit vollständig geschlossener ossärer Brücke (Typ 5; n = 27) auf. Inferiore (Typ 3) sowie kombinierte Lingulae (Typ 4) wurden nur selten beobachtet (n = 4 bzw. n = 3).

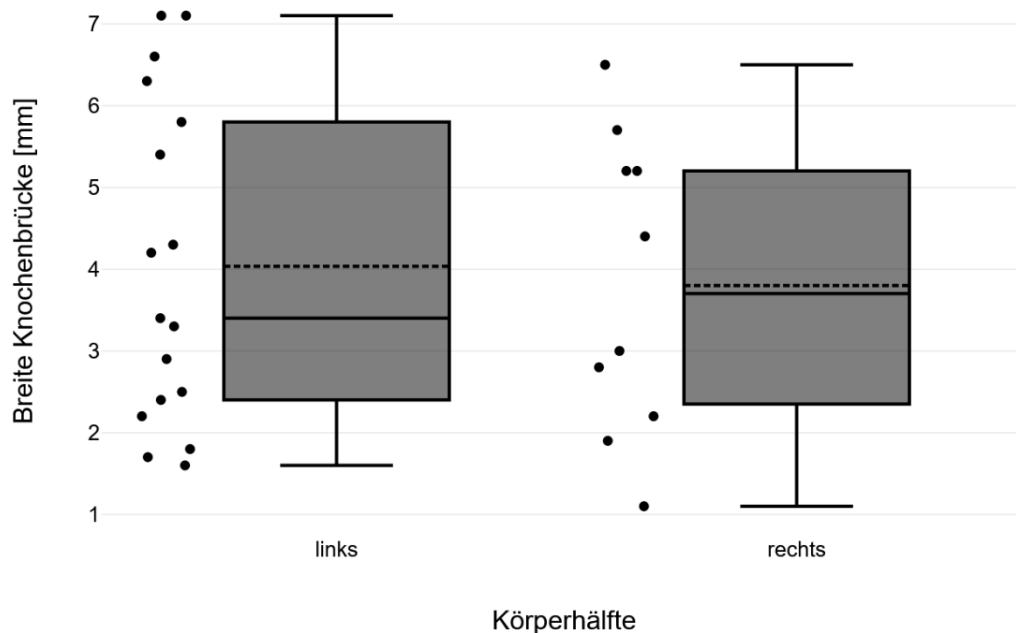


Abbildung 11: Entfernung zwischen zwei Knochenöffnungen bei Vorliegen einer Kanalduplikatur

An den in der vorliegenden Studie untersuchten Körperspenden konnten folgende Werte ermittelt werden:

Links (n = 49): M = 4,04 mm, Q1 = 2,4 mm, Q3 = 5,8 mm, Min = 1,6 mm, Max = 7,1 mm.
Rechts (n = 52): M = 3,8 mm, Q1 = 2,35 mm, Q3 = 5,2 mm, Min = 1,1 mm, Max = 6,5 mm.

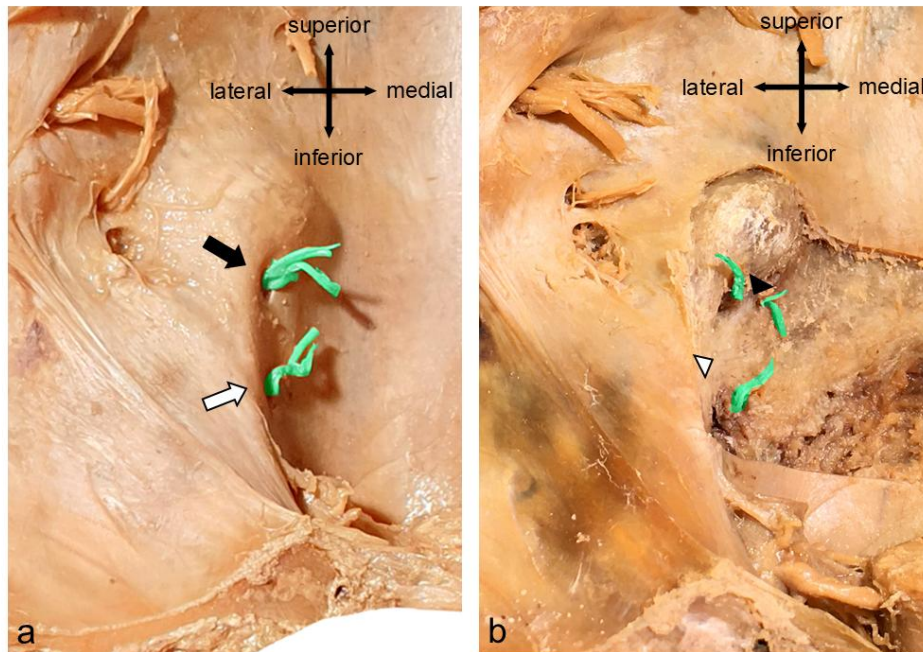


Abbildung 12: Triplikatur eines linken Canalis nervi hypoglossi

Zur besseren Darstellung wurden die Fasern des N. hypoglossus grün eingefärbt.

a: Oberes (schwarzer Pfeil) und unteres (weißer Pfeil) Bündel des N. hypoglossus mit getrennten duralen Pori. b: Nach Entfernung der Dura mater zeigt sich eine größere untere hypoglossale Knochenbrücke (weiße Pfeilspitze) sowie eine schmale ossäre Septierung oben (schwarze Pfeilspitze), welche drei separate Eingänge in den Canalis nervi hypoglossi bilden.

Ergebnisse

Präparat-Nr.	Anzahl Durapori	Distanz zw. d. Durapori [mm]	Variante CNH	Breite Knochenbrücke [mm]
JK 1 R	2	3,9	Typ 3	
JK 2 L	1		Typ 1	
JK 3 L	2	5,2	Typ 5	2,5
JK 4 L	2	2,8	Typ 1	
JK 5 R	2	4,1	Typ 1	
JK 6 R	2	1,9	Typ 2	
JK 7 R	2	3,0	Typ 1	
JK 8 R	2	3,4	Typ 1	
JK 9 L	2	4,2	Typ 5	2,9
JK 10 R	2	2,6	Typ 3	
JK 11 L	2	7,1	Typ 5	4,3
JK 12 R	2	4,1	Typ 1	
JK 13 L	2	4,9	Typ 1	
JK 14 R	2	3,9	Typ 2	
JK 15 R	2	3,1	Typ 5	4,4
JK 16 R	1		Typ 1	
JK 17 L	2	7,4	Typ 5	7,1
JK 18 L	2	5,1	Typ 5	3,4
JK 19 R	1		Typ 1	
JK 20 L	2	7,2	Typ 5	7,1
JK 21.1 L	2	3,3	Typ 2	
JK 21.2 R	1		Typ 2	
JK 22 R	2	3,5	Typ 2	
JK 23 R	1		Typ 1	
JK 24 R	1		Typ 1	
JK 25 L	2	4,8	Typ 5	3,3
JK 26.1 L	2	1,9	Typ 4	
JK 26.2 R	2	2,3	Typ 1	
JK 27 L	1		Typ 1	
JK 28 R	2	5,3	Typ 2	
JK 29 L	2	4,8	Typ 1	
JK 30 R	1		Typ 2	
JK 31 R	2	3,7	Typ 4	
JK 32 R	3	2,8; 2,1	Typ 2	
JK 33 L	1		Typ 2	
JK 34.1 L	1		Typ 5	2,2
JK 34.2 R	2	4,7	Typ 5	3,0
JK 35 L	1		Typ 2	
JK 36 R	2	6,9	Typ 2	
JK 37 R	1		Typ 1	
JK 38 L	2	3,1	Typ 1	
JK 39 R	2	6,7	Typ 5	6,5
JK 40 L	1		Typ 1	
JK 41 R	2	5,9	Typ 1	
JK 42 L	2	4,4	Typ 1	
JK 43.1 L	2	2,4	Typ 1	
JK 43.2 R	2	5,2	Typ 5	5,2
JK 44.1 L	2	4,2	Typ 2	
JK 44.2 R	1		Typ 2	
JK 45.1 L	2	2,3	Typ 1	
JK 45.2 R	1		Typ 2	

Ergebnisse

Präparat-Nr.	Anzahl Durapori	Distanz zw. d. Durapori [mm]	Variante CNH	Breite Knochenbrücke [mm]
JK 46.1 L	2	8,7	Typ 5	5,8
JK 46.2 R	2	5,1	Typ 2	
JK 47.1 L	2	5,6	Typ 1	
JK 47.2 R	2	4,0	Typ 1	
JK 48.1 L	1		Typ 1	
JK 48.2 R	2	5,1	Typ 2	
JK 49.1 L	2	2,2	Typ 2	
JK 49.2 R	2	4,9	Typ 2	
JK 50.1 L	1		Typ 2	
JK 50.2 R	2	4,6	Typ 2	
JK 51.1 L	1		Typ 2	
JK 51.2 R	2	4,1	Typ 1	
JK 52.1 L	2	8,2	Typ 5	6,3; 1,8
JK 52.2 R	2	6,5	Typ 5	5,7
JK 53.1 L	1		Typ 1	
JK 53.2 R	1		Typ 1	
JK 54.1 L	2	6,0	Typ 5	6,6
JK 54.2 R	2	6,9	Typ 2	
JK 55.1 L	1		Typ 1	
JK 55.2 R	2	4,4	Typ 1	
JK 56.1 L	2	4,7	Typ 5	1,8
JK 56.2 R	1		Typ 2	
JK 57 R	2	4,6	Typ 4	
JK 58.1 L	3	1,8; 2,2	Typ 2	
JK 58.2 R	2	3,3	Typ 2	
JK 59 L	1		Typ 1	
JK 60.1 L	1		Typ 2	
JK 60.2 R	1		Typ 2	
JK 61.1 L	1		Typ 2	
JK 61.2 R	2	5,5	Typ 1	
JK 62.1 L	2	4,0	Typ 5	2,4
JK 62.2 R	2	3,1	Typ 2	
JK 63.1 L	2	5,3	Typ 3	
JK 63.2 R	2	5,1	Typ 3	
JK 64.1 L	2	6,2	Typ 5	1,7
JK 64.2 R	2	7,9	Typ 5	5,2
JK 65.1 L	1		Typ 5	5,4
JK 65.2 R	1		Typ 2	
JK 66.1 L	2	4,6	Typ 1	
JK 66.2 R	2	3,4	Typ 5	1,1
JK 67.1 L	2	3,5	Typ 1	
JK 67.2 R	1		Typ 1	
JK 68.1 L	1		Typ 2	
JK 68.2 R	1		Typ 5	1,9
JK 69.1 L	2	4,7	Typ 5	1,6
JK 69.2 R	2	4,4	Typ 5	2,8
JK 70.1 L	1		Typ 2	
JK 70.2 R	2	6,9	Typ 5	2,2
JK 71 L	2	7,2	Typ 5	4,2
JK 72 L	1		Typ 1	

Tabelle 1: Übersicht erfasste Durchtrittsvarianten und Messdaten

Grau hinterlegte Zeilen kennzeichnen Präparate mit vollständig vorliegender Schädelbasis. Weiß hinterlegte Zeilen verweisen hingegen auf Präparate, bei denen lediglich eine Schädelhälfte vorlag oder die Gegenseite aufgrund lagerungsbedingter Schäden nicht in die Auswertung einbezogen werden konnte.

R	= rechte Körperseite
L	= linke Körperseite
Typ 1	= einfacher Kanal
Typ 2	= Kanal mit Exostose am oberen Rand (obere Lingula)
Typ 3	= Kanal mit Exostose am unteren Rand (untere Lingula)
Typ 4	= Kanal mit sowohl oberer als auch unterer Lingula
Typ 5	= Kanal mit vollständig geschlossener knöcherner Brücke

Ergebnisse

Seite	Anzahl Durapori	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit [%]	Distanz zw. d. Durapori [mm]
rechts	1	15	28,9	
	2	36	69,2	4,6 ± 1,4
	3	1	1,9	2,8 und 2,1
links	1	18	36,7	
	2	30	61,3	4,9 ± 1,8
	3	1	2,0	1,8 und 2,2
total	1	33	32,7	
	2	66	65,3	4,7 ± 1,6
	3	2	2,0	

Tabelle 2: Prävalenz und Messdaten duraler Durchtrittsvarianten des N. hypoglossus

Seite	Typ	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit [%]	Breite Knochenbrücke [mm]
rechts	1	17	32,7	
	2	20	38,5	
	3	3	5,8	
	4	2	3,9	
	5	10	19,2	3,8 ± 1,8
links	1	18	36,7	
	2	12	24,5	
	3	1	2,0	
	4	1	2,0	
	5	17	34,7	4,0 ± 2,0
total	1	35	34,7	
	2	32	31,7	
	3	4	4,0	
	4	3	3,0	
	5	27	26,7	3,9 ± 1,9

Tabelle 3: Prävalenz und Messdaten knöcherner Durchtrittsvarianten des N. hypoglossus

5 Diskussion

5.1 Entwicklung des Canalis nervi hypoglossi

Die Entwicklung des Hypoglossuskanals beginnt in der 7. Entwicklungswoche mit der knorpeligen Umschließung der neurovaskulären Strukturen (u.a. den Hypoglossusfasern). Im weiteren Verlauf verschmelzen die kartilaginären Anlagen, bevor die Verknöcherung des Os occipitale, ausgehend von vier chondralen Ossifikationszentren und einem desmalen (Squama occipitalis) Ossifikationszentrum, einsetzt. Zum Zeitpunkt der Geburt sind die Pars basilaris des Os occipitale (Basioccipitale) und die beiden Partes laterales ossis occipitalis (Exoccipitalia) noch durch Synchondrosen voneinander getrennt (Abb. 4), bevor sie üblicherweise bis zum 4. Lebensjahr miteinander verschmelzen (Som und Naidich, 2013; Standing, 2016).

Die Frage, ob Hirnnervenforamina wie der Canalis nervi hypoglossi bereits bei der Geburt vollständig ausgebildet sind, wird durch die Untersuchungen von Weigner (1912) an humanen Embryonen erstmals adressiert. Seine Befunde machen deutlich, dass bereits bei Embryonen von 17,75 mm Scheitel-Steiß-Länge (SSL) vollständig knorpelig ausgebildete Canales nervi hypoglossi nachweisbar sind. In fortgeschritteneren Entwicklungsstadien identifizierte Weigner Feten, bei denen sich auf der einen Seite vollständig ossifizierte Knochenbrücken im Bereich des Canalis nervi hypoglossi fanden, während die Gegenseite zum selben Zeitpunkt noch überwiegend aus unverknöchertem Knorpelgewebe bestand (Weigner, 1912).

Weigners Beobachtungen können damit auf eine asynchrone Ossifikationsdynamik zwischen der rechten und linken Schädelbasis hindeuten.

5.2 Duplikatur des Canalis nervi hypoglossi

Aufbauend auf den Befunden Weigners untersuchte Ingelmark (1947) die Ausbildung des Canalis nervi hypoglossi anhand von Embryonen unterschiedlichen Entwicklungsalters mit einer Scheitel-Steiß-Länge von 6,0–82,0 mm und erfasste deren Varianten quantitativ. Nach seinen Beobachtungen war bei Individuen mit einer Scheitel-Steiß-Länge von ≤ 15 mm in allen Fällen mindestens ein gedoppelter Kanal vorhanden, wobei die Teilung des Canalis nervi hypoglossi in diesen Stadien durch eine bindegewebige, nicht verknorpelte Scheidewand bedingt war. Dieser Anteil verringerte sich bei Embryonen mit einer Scheitel-Steiß-Länge von ≥ 16 mm auf 20,8 %, stieg jedoch bei Neugeborenen wieder auf 38,4 % an. In Ingelmarks Untersuchungsgut erwachsener Individuen wurde für einen bipartiten Canalis nervi hypoglossi eine Prävalenz von 56,2 % festgestellt (Ingelmark, 1947).

In einer weiterführenden Untersuchung ging Dodo (1980) der Frage nach, in welchem Ausmaß sich die Prävalenz gedoppelter Hypoglossuskanäle zwischen Feten und Erwachsenen Individuen unterscheidet. Zu diesem Zweck analysierte er eine größere japanische Stichprobe von 160 Feten und 225 erwachsenen Individuen im Alter von über 18 Jahren. Dodos Ergebnisse zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen einer knöchernen Brücke zum Zeitpunkt der Geburt innerhalb der japanischen Population mit zunehmendem Gestationsalter steigt (CRL 250 mm = 7,4 %, 300 mm = 8,5 %, 350 mm = 15,0 %). Während vollständig gedoppelte Hypoglossuskanäle bei 10,0 % der Feten (24.–40. SSW) nachgewiesen wurden, lag der Anteil im Erwachsenenalter (>18 Jahre) bei 16,9 % (Dodo, 1980).

Die Befunde von Ingelmark (1947) und Dodo (1980) zeigen, dass die Prävalenz bipartiter Canales nervi hypoglossi im Verlauf der prä- und postnatalen Entwicklung Schwankungen unterliegen kann, wobei die zugrunde liegenden Mechanismen dieser fluktuierenden Häufigkeitsverteilungen bislang nicht abschließend geklärt sind.

5.3 Sekundäre Ossifikation als Einflussfaktor auf die Prävalenz von Kanalduplikaturen

Um die in dieser Arbeit ermittelten Häufigkeiten innerhalb der europäischen Population einordnen zu können, wurden die Untersuchungen von Hauser und De Stefano (italienisch-österreichische Population) sowie Paraskevas *et al.* (griechische Population) herangezogen. Beide Studien erfassen – analog zur vorliegenden Arbeit – die Prävalenz sämtlicher knöcherner Durchtrittsvarianten (Typ 1–5).

In der Studie von Hauser und De Stefano (1985) konnte anhand einer Stichprobe von 130 Schädeln mit einem medianen Alter der untersuchten Individuen von 35 Jahren eine vollständige Kanalduplikatur in 16,2 % der Fälle nachgewiesen werden. Paraskevas *et al.* (2008) berichteten auf Basis ihrer Stichprobe von 116 Schädeln mit einem durchschnittlichen Alter von 50 Jahren über eine höhere Prävalenz knöcherner Brücken von 21,6 % innerhalb der griechischen Population. In der vorliegenden Arbeit, die ausschließlich Schädel von Personen über 60 Jahren einbezog, konnte ein doppelt ausgeprägter Hypoglossuskanal in 26,7 % der Fälle nachgewiesen werden.

Invers hierzu verhält sich die Prävalenz der einfachen Durchtrittsvariante innerhalb der betrachteten europäischen Stichproben. Die jüngste der untersuchten Kollektive (Hauser und De Stefano, 1985) wies mit 65,4 % den höchsten Anteil einfacher Durchtritte auf, während die Untersuchung von Paraskevas *et al.* (2008) mit einem medianen Alter von 50 Jahren einen Anteil von 59,5 % ergab. In der vorliegenden Studie, welche die Stichprobe mit dem höchsten medianen Alter repräsentierte, betrug der Anteil einfacher Kanalvarianten 34,7 %, womit der niedrigste Wert im Vergleich zu den anderen Untersuchungen festgestellt wurde.

Mit Häufigkeiten gedoppelter Hypoglossuskanäle zwischen 16,2 % und 26,7 % (Mittelwert = 21,5 %) zeigen die europäischen Studien eine Spannweite von etwa 10 %. Eine mögliche Erklärung ist ein Einfluss des Alters auf die Häufigkeit knöcherner Brücken und Lingulae.

Ingelmark (1947) diskutiert zwei mögliche Mechanismen, die zum Anstieg der Fälle mit einem gedoppelten Hypoglossuskanal im Laufe des Lebens beitragen können. Zum einen könne das ursprünglich lockere Bindegewebe, das bei der einfachen Kanalvariante zwischen den Hypoglossuswurzeln im Knochenkanal liegt, über die Zeit einer chondralen Umwandlung unterliegen und letztlich ossifizieren. Zum anderen erscheint es Ingelmark (1947) plausibel, dass das zwischen zwei Durapori gelegene durale Gewebe verknöchern und in der Folge mit den Wänden des Kanals fusionieren könne. Auch Karasu *et al.* (2009), die sich in ihrer Arbeit mit der mikrochirurgischen Anatomie des Hypoglossuskanals und seinen topographischen Beziehungen zu benachbarten knöchernen, vaskulären und neuralen Strukturen befassten, halten es für möglich, dass Kalzifikationen des duralen Gewebes im Bereich des

Knochenkanals oder Fusionsstörungen der kartilaginären Anlagen des Os occipitale zur Ausbildung sekundärer Verknöcherungen des Hypoglossuskanals beitragen könnten.

Dass sowohl das mittlere Lebensalter wie auch die Altersspannweite untersuchter Kollektive potenzielle Einflussfaktoren für das Auftreten hyperostotischer Skelettveränderungen darstellen, konnte Ossenberg (1974) am Beispiel der Prävalenz mylohyoidaler Brücken nachweisen. Auf Grundlage Ossensbergs Befunde betonte Corruccini (1974) deshalb die Notwendigkeit, Prävalenzvergleiche diskontinuierlicher Schädelmerkmale ausschließlich innerhalb klar definierter Altersgruppen vorzunehmen, um reproduzier- und vergleichbare Aussagen zu ermöglichen. Nach aktuellem Kenntnisstand liegen jedoch nur wenige Datensätze vor, die einen Vergleich bezüglich der Häufigkeit gedoppelter Canales nervi hypoglossi unter Berücksichtigung dieser Kriterien zulassen würden.

Hinsichtlich definierter Alterskohorten stellt die Zusammenschau der Untersuchungen von Dodo (1980) und Kanda *et al.* (2015) eine wertvolle Ausnahme dar. Beide Stichproben wurden zudem innerhalb der japanischen Population erhoben, wodurch ein weiterer potenzieller Einflussfaktor im Sinne regionaler Unterschiede vermindert werden konnte. Dodo (1980) dokumentierte in seiner Analyse erwachsener japanischer Individuen eine Prävalenz der Kanalduplikatur von 16,9 %. Kanda *et al.* (2015) führten im Rahmen einer umfassenden radiologischen Studie eine Untersuchung an 590 erwachsenen Personen durch. Die Bilddaten wurden mittels Multidetektor-Computertomographie (MDCT) im Rahmen kontrastverstärkter zerebraler CT-Angiographien bei einem Patientenkollektiv mit unterschiedlichen zentralnervösen Pathologien erhoben und mit einer Schichtdicke von ≤ 1 mm rekonstruiert. Die Beurteilung der vorliegenden Kanalvarianten erfolgte konsensbasiert durch mehrere erfahrene Fachärzte für Radiologie. Ihre Ergebnisse bestätigten einerseits die von Dodo ermittelte Prävalenz von etwa 17 % in der Gruppe erwachsener Probanden, konnten andererseits jedoch zeigen, dass das Alter nach Abschluss der Adoleszenz innerhalb der japanischen Stichprobe einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Hypoglossusduplikatur hatte (Odds Ratio = 0,996) (Kanda *et al.*, 2015).

Im Gegensatz zu den in der vorliegenden Arbeit beobachteten altersassoziierten Häufigkeitsunterschieden bipartiter Canales nervi hypoglossi innerhalb europäischer Stichproben deuten die Ergebnisse von Kanda *et al.* (2015) darauf hin, dass das Lebensalter nach Abschluss der Adoleszenz nicht in allen Populationen einen relevanten Einfluss auf die Ausbildung einer Kanalduplikatur ausübt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sekundäre Ossifikationsprozesse bei der Interpretation der Häufigkeit bipartiter Canales nervi hypoglossi als potenzieller Einflussfaktor zu berücksichtigen sind. Sie stellen eine plausible Erklärung für Unterschiede zwischen fetalen, jungen und älteren Untersuchungskollektiven dar und können zur Variabilität der

berichteten Häufigkeiten beitragen. Die Ergebnisse von Kanda et al. (2015) verdeutlichen jedoch, dass ein altersabhängiger Effekt nach Abschluss der Adoleszenz nicht zwingend nachweisbar ist.

5.4 Genetische und populationspezifische Determinanten

Im Folgenden erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse im globalen Vergleich. Hierzu wurde die Untersuchung von Hanihara und Ishida (2001) herangezogen, welche die Prävalenz verschiedener diskontinuierlicher Schädelmerkmale, darunter auch Knochenbrücken des Hypoglossuskanals, zwischen verschiedenen Populationen beschreibt. Die Studie basiert auf mehr als 10.000 untersuchten Individuen unterschiedlichen Geschlechts und Alters und bezieht sowohl zeitgenössische Stichproben wie auch archäologische Funde moderner Menschen mit ein.

So lässt sich die in der vorliegenden Arbeit ermittelte Prävalenz vollständig geschlossener Knochenbrücken (Typ 5) innerhalb des *Canalis nervi hypoglossi* von 26,7 % im weltweiten Vergleich dem oberen Drittel zuordnen. Regionen mit einer höheren Prävalenz sind Nordamerika (36,4 %), Nordafrika (30,1 %) und die Arktis (28,9 %), während niedrigere Werte in asiatischen, subsaharisch-afrikanischen und ozeanischen Regionen beobachtet wurden (Hanihara und Ishida, 2001).

Beim Vergleich der Prävalenzen zwischen nordamerikanischen und europäischen Populationen auf Grundlage der Erhebungen von Hanihara und Ishida (2001) zeigte sich, dass in Nordamerika mit 34,3 % ein höherer Anteil an gedoppelten *Canales nervi hypoglossi* erfasst werden konnte als in Europa (28,5 %). Angesichts der Tatsache, dass Nordamerika historisch zu großen Teilen durch europäische Siedler bevölkert wurde (Hesse, 2013), erscheinen diese Unterschiede zunächst unerwartet. Berücksichtigt man jedoch die innerhalb der europäischen Populationen (einschließlich des Vereinigten Königreichs) dokumentierte Spannweite von 15,7 bis 33,3 % bei einer mittleren Prävalenz von 28,0 % im Datensatz von Hanihara und Ishida (2001), so könnten die beobachteten Diskrepanzen zumindest teilweise auf Prozesse zurückzuführen sein, die den Mechanismen eines Gründereffekts genetischer Merkmale ähneln (Kolbe *et al.*, 2012).

Die frühen europäischen Siedler in Amerika stellten oft nur kleine, nicht repräsentative Stichproben der Grundgesamtheit ihres Herkunftslandes dar. Der Nordosten Amerikas beispielsweise, der ab 1620 maßgeblich durch die englischen Puritaner besiedelt wurde (Hesse, 2013) zählt mit einem Anteil an gedoppelten Hypoglossuskanälen von 36,4 % zu den Orten mit dem höchsten globalen Vorkommen, während die Prävalenz für das Vereinigte Königreich 27,8 % beträgt (Hanihara & Ishida, 2001).

Falls innerhalb der Gründerpopulationen der Anteil an Hypoglossusduplikaturen überdurchschnittlich hoch war, könnte dies ein Erklärungsansatz für den Unterschied zum europäischen Mittel sein. Zudem könnte der Anteil der Duplikaturen ganz besonders dort gestiegen sein, wo Populationen mit hoher Prävalenz des Merkmals während der Besiedelung

Nordamerikas aufeinandertrafen. Die geringe Prävalenz (9,4 %) der untersuchten Kanalvariante in Australien (Hanihara & Ishida, 2001), dessen Bevölkerung durch mehrere Einwanderungswellen europäischer Populationen geprägt wurde (Genger, 2018), könnte in umgekehrter Weise durch denselben Mechanismus erklärt werden.

Dass anatomische Normvarianten grundsätzlich eine genetische Komponente für ihr gehäuftes Auftreten besitzen können, konnte durch Hanihara *et al.* (1998) gezeigt werden. Am Beispiel des Os zygomaticum bipartitum, einer Abwandlung des Gesichtsschädels, bei der das Jochbein durch eine horizontal verlaufende Sutur geteilt ist, verdeutlichen die Autoren, dass knöcherne anatomische Variationen nicht primär durch Umweltfaktoren oder die Lebensführung spezifischer Bevölkerungsgruppen beeinflusst werden. Vielmehr postulieren sie auf Basis ihrer globalen Analyse, dass derartige Variationen maßgeblich auf einen erblichen Hintergrund zurückzuführen sind (Hanihara *et al.*, 1998).

Zusammenfassend deuten populationsübergreifende Analysen darauf hin, dass die beobachteten Unterschiede in der Prävalenz gedoppelter Canales nervi hypoglossi einerseits durch altersabhängige Prozesse wie sekundäre Ossifikationen, andererseits durch populationspezifische genetische Einflüsse erklärbar sein können (Hanihara & Ishida, 2001).

5.5 Lateralität hyperostotischer Schädelmerkmale

Im Rahmen ihrer Studien analysierte Ossenberg (1970) hyperostotische Merkmale an 78 humanen Schädeln nordamerikanischer Populationen. Hierbei handelt es sich um anatomische Normvarianten, die durch eine überschießende oder sekundäre Verknöcherung ursprünglich bindegewebiger Strukturen entstehen, wie dies beispielsweise bei den Knochenbrücken im Bereich des Canalis nervi hypoglossi der Fall sein kann (vgl. Ingelmark, 1947). Über die bereits diskutierte altersabhängig progressive Prävalenz hinaus zeigte sich im untersuchten Material Ossensbergs, dass derartige Normvarianten, darunter hypoglossale und mylohyoidale Knochenbrücken sowie clinoidale „Sellabrücken“ (Fusion der Processus clinoides anteriores et posteriores), gehäuft an der linken Schädelhälfte und insgesamt öfter bei männlichen Individuen zu beobachten waren (Ossenberg, 1970).

In Übereinstimmung mit Ossensbergs Befunden konnten Kanda *et al.* (2015) anhand ihrer Daten (590 erwachsene Individuen) ebenfalls dokumentieren, dass eine knöcherne Septierung des Hypoglossuskanals mit einer höheren Prävalenz auf der linken Schädelhälfte auftrat (links 13,8 %; rechts 10,6 %). Auch in der Stichprobe von Lang *et al.* (1993), die 120 Schädelhälften erwachsener Individuen deutscher Ethnie einschloss, zeigte sich mit einer Prävalenz doppelt angelegter Hypoglossuskanäle von 27,5 % auf der linken und 15 % auf der rechten Seite ein vergleichbares Verteilungsmuster. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den Befunden der vorliegenden Untersuchung, in welcher ein gedoppelter Durchtritt auf der linken Seite in 34,7 % und auf der rechten Seite in 19,2 % der Fälle nachgewiesen werden konnte.

Ergänzend sei an dieser Stelle erwähnt, dass knöcherne Ausziehungen in Form von Lingulae (Typ 2–4) links in 28,6 % und rechts in 48,1 % der untersuchten Schädelhälften beobachtet wurden. Auch fand sich ein gedoppelter Duradurchtritt im Mainzer Untersuchungsgut diskret häufiger auf der rechten Seite (links 61,3 %; rechts 69,2 %).

Ossenberg (1970) wertete ihre Ergebnisse als repräsentativ und führte die beobachtete Linksdominanz auf determinierte asymmetrische Ossifikationsprozesse zurück. In Übereinstimmung mit dieser Interpretation beschrieb Torgersen (1951) anhand eines Kollektivs von 404 Kindern unter neun Jahren, dass die Ossifikation der linken Handwurzelknochen im Vergleich zur rechten Seite schneller voranschreitet. Die beobachtete Asymmetrie wurde von Torgersen (1951) mit hemisphärischer Dominanz sowie Unterschieden in der Innervationsdichte und begleitenden vaskulären Einflüssen in Zusammenhang gebracht, was eine seitenabhängig beschleunigte Ossifikationsdynamik begünstigen könne.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Ossenberg (1970) gelangten Hanihara und Ishida (2001) in ihrer umfangreichen Untersuchung zu einem abweichenden Befund. In ihrer Studie erfolgte die Analyse von sieben inkonstant auftretenden hyperostotischen Schädelmerkmalen,

darunter auch hypoglossale Brücken, an einer Stichprobe von über 10.000 Individuen aus verschiedenen geographischen Populationen. Die Auswertung der Daten ergab keine statistisch signifikanten Seitenpräferenzen bezüglich einzelner Schädelmerkmale, womit die von Ossenberg (1970) postulierte Linksdominanz hyperostotischer Merkmale nicht bestätigt werden konnte (Hanihara und Ishida, 2001).

Hanihara und Ishida (2001) führen seitenabhängige Häufungen inkonstanter Schädelmerkmale – wie sie etwa von Ossenberg beschrieben wurden – auf das Konzept der fluktuierenden Asymmetrie zurück. Dieses Konzept geht davon aus, dass stochastische genetische und umweltbedingte Fluktuationen („developmental noise“) während der Ontogenese Einfluss auf wegweisende physiologische Prozesse wie Genexpression, Zellteilung, Wachstum oder Stoffwechselaktivität nehmen können. Derartige Einflüsse wirken grundsätzlich auf beiden Körperseiten, werden jedoch nicht immer vollständig auf der entgegengesetzten Körperhälfte ausgeglichen. Dadurch können geringfügige, nicht gerichtete Abweichungen von der idealen bilateralen Symmetrie entstehen, die als Ausdruck zufälliger Entwicklungsvariabilität und somit als Manifestation fluktuierender Asymmetrie gelten (Palmer und Strobeck, 2003).

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung eine deutliche Übereinstimmung mit den Befunden von Ossenberg (1970), Kanda *et al.* (2015) und Lang und Hornung (1993) zeigen. Besonders die Übereinstimmung mit den Daten von Lang und Hornung (1993), deren Untersuchung ebenfalls an einer deutschen Population durchgeführt wurde, lässt vermuten, dass innerhalb dieser Ethnie eine Tendenz zu einer linksseitig höheren Prävalenz hypoglossaler Brücken bestehen kann. Der abweichende Befund anhand der globalen Stichprobe von Hanihara und Ishida (2001) verdeutlicht jedoch, dass sich seitenabhängige Prävalenzen in unterschiedlichen Populationen ausgleichen könnten.

5.6 Biologisches Geschlecht und hypoglossale Brückenbildung

In dem von Ossenberg (1970) untersuchten Material zeigte sich neben einer linksseitig erhöhten Prävalenz eine insgesamt häufigere Ausprägung entsprechender Merkmale bei männlichen Individuen. Diese Befunde werfen die Frage auf, ob neben seitenabhängigen Entwicklungsprozessen auch geschlechtsspezifische Determinanten an der Ausbildung gedoppelter Canales nervi hypoglossi beteiligt sein könnten.

Auf Grundlage des Mainzer Untersuchungsguts lassen sich hierzu keine verlässlichen Schlussfolgerungen ziehen, da Angaben zum Geschlecht der untersuchten Individuen nicht vorlagen. Die Körperspenden waren anonymisiert, wodurch eine entsprechende Zuordnung nicht möglich war. Von insgesamt 101 analysierten Schädelhälften konnte das Geschlecht lediglich in 36 Fällen durch konsensbasierte Beurteilung mehrerer Untersucher mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden. Die Einschätzung stützte sich hierbei auf den visuellen Gesamteindruck potenziell geschlechtsdimorpher Dimensionen, insbesondere der Reliefausprägung und der Proportionsverhältnisse des Gesichtsschädels. Zur Einordnung der methodischen Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Studie sollen im Folgenden die in der Literatur beschriebenen Verfahren zur geschlechtsdiagnostischen Beurteilung des Schädels zusammengefasst werden. Dies dient zugleich der Begründung, weshalb im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine weiterführende Geschlechtsbestimmung über die makroskopische Beurteilung der vorliegenden Präparate hinaus vorgenommen wurde.

In der Fachliteratur sind verschiedene Verfahren zur Geschlechtsbestimmung auf der Grundlage von Schädelmerkmalen dokumentiert. Lynnerup *et al.* (2006) überprüften, ob der Durchmesser des Porus acusticus internus als geschlechtsdiagnostisches Merkmal herangezogen werden könne. Das Interesse der Forschenden an dieser anatomischen Struktur erklärt sich daraus, dass diese in der äußerst widerstandsfähigen Pars petrosa ossis temporalis lokalisiert ist, welche selbst bei fragmentierten oder kremierten Skeletten häufig erhalten bleibt. Zudem zeichnet sich die Struktur durch eine vergleichsweise einfache morphometrische Analyse aus. Das Untersuchungsmaterial umfasste 173 Felsenbeine erwachsener, südwestdeutscher Individuen aus einer forensisch-osteologischen Sammlung. Die Messung des inneren Gehörgangdurchmessers erfolgte unter Verwendung standardisierter Metallbohrer (Lynnerup *et al.*, 2006).

Lynnerup *et al.* (2006) konnten signifikante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Individuen bezüglich der Kanalgröße dokumentieren (Männer: Ø 3,7 mm; Frauen: Ø 3,4 mm; $p < 0,009$). Trotz dieses Befundes zeigte sich jedoch, dass die Methode nur eine eingeschränkte Trennschärfe aufweist, da eine korrekte Geschlechtszuordnung lediglich in

etwa 70 % der Fälle möglich war. Der Durchmesser des *Foramen acusticus externus* könne daher laut Autoren als unterstützender, jedoch nicht als verlässlicher Parameter zur Geschlechtsbestimmung angesehen werden (Lynnerup *et al.*, 2006).

Im Gegensatz zu Lynnerup *et al.* (2006) untersuchte Walker (2008) in der Folge, ob sich durch die Kombination mehrerer makroskopisch beurteilbarer Schädelmerkmale die Zuverlässigkeit der Geschlechtsbestimmung erhöhen ließe. Grundlage seiner Analyse bildete die Bewertung von fünf prominenten Strukturen des Schädels (*Glabella*, *Margo supraorbitalis*, *Crista nuchae*, *Processus mastoideus* und *Eminentia mentalis*) nach dem Scoringsystem von Buikstra und Ubelaker (1994) (Walker, 2008). Dieses beruht auf einer fünfstufigen ordinalen Skala (1–5), die den Grad der morphologischen Ausprägung der jeweiligen Struktur erfasst. Dabei wird nicht die absolute Größe, sondern die Form, das Relief und die knöcherne Robustizität der Merkmale beurteilt (Buikstra und Ubelaker, 1994).

Die Untersuchung basierte auf 304 modernen Schädeln unterschiedlicher Populationen mit dokumentiertem Geschlecht sowie 156 prähistorischen nordamerikanischen Individuen, deren Geschlecht anhand des Beckenskeletts bestimmt worden war. Mithilfe dieser Methode erzielte Walker (2008) bei den modernen Proben Trefferquoten von etwa 90 % und bei den prähistorischen Skeletten eine Genauigkeit von rund 78 %. Der Ansatz verdeutlicht, dass die systematische Erfassung und statistische Auswertung visuell erfassbarer morphologischer Merkmale zu einer deutlich höheren diagnostischen Präzision führen kann als die ausschließliche Verwendung einzelner metrischer Parameter, wie sie etwa im Ansatz von Lynnerup *et al.* (2006) zur Anwendung kam (Walker, 2008).

Neuere Studien legen nahe, dass die Zuverlässigkeit der geschlechtsdiagnostischen Beurteilung weiter gesteigert werden kann, wenn sowohl makroskopische Merkmale des Beckens wie auch des Schädels in Kombination berücksichtigt werden. In einer genetisch validierten Untersuchung an mittelalterlichen Skeletten aus Cambridge konnten Inskip *et al.* (2018) durch die gemeinsame Auswertung beider Skelettelemente eine Trefferquote von rund 98 % erzielen. Im Vergleich dazu lag die Genauigkeit bei der ausschließlichen Analyse des Beckens bei etwa 96 %, während die alleinige Beurteilung des Schädels lediglich 88 bis 90 % korrekte Zuordnungen ergab (Inskip *et al.*, 2018). Krishan *et al.* (2016) heben in ihrer Übersichtsarbeit ergänzend hervor, dass insbesondere die integrative Anwendung morphologischer und morphometrischer Verfahren – unter Einbeziehung sowohl kranialer als auch pelviner Merkmale – die höchste diagnostische Sicherheit gewährleistet.

Trotz des Einsatzes moderner geometrisch-morphometrischer Verfahren konnten auch neuere Ansätze keine höheren Trefferquoten erzielen. Del Bove *et al.* (2023) entwickelten ein dreidimensionales, landmarkbasiertes Verfahren zur Kartierung des Sexualdimorphismus am

menschlichen Schädel. Anhand rezenter Vergleichsdaten wurden dabei jene Bereiche identifiziert, die besonders deutliche geschlechtsspezifische Unterschiede aufweisen – vor allem die glabellare, supraorbitale, mastoide und nasale Region (vgl. Walker 2008; Garvin und Ruff 2012; Bastir *et al.* 2011; Del Bove *et al.* 2020; Del Bove *et al.* 2023). Die höchste Diskriminationsgenauigkeit wurde durch die kombinierte Auswertung dieser Regionen erreicht, lag mit etwa 75–77 % jedoch unterhalb der Werte klassischer makroskopischer Methoden. Die Autorinnen und Autoren betonen, dass sich die Treffsicherheit moderner, digital gestützter Verfahren im Vergleich zu bewährten makroskopischen Ansätzen nicht verbessern ließe (Del Bove *et al.*, 2020).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung waren die Bedingungen zur Anwendung der beschriebenen geschlechtsdiagnostischen Verfahren nicht gegeben. Zum einen standen neben überwiegend nur partiell erhaltenen Schädelbasen lediglich 29 vollständige Köpfe zur Verfügung, sodass eine standardisierte Erfassung mehrerer kranialer Merkmale nach den gängigen Bewertungssystemen nicht umfassend hätte durchgeführt werden konnte. Zum anderen lagen keine zugehörigen Beckenskelette vor, wodurch die in der Literatur als besonders zuverlässig geltende Methode der Kombination beider Skelettelemente ausgeschlossen war. Eine ergänzende genetische Geschlechtsbestimmung war aufgrund der langjährigen Lagerung der Präparate in Formalin ebenfalls nicht verlässlich durchführbar. Vor dem Hintergrund der beschriebenen methodischen Einschränkungen wurde auf eine Geschlechtsbestimmung am Mainzer Untersuchungsgut verzichtet, da die zu erwartende Aussagekraft als unzureichend einzuschätzen war.

Für die Bewertung geschlechtsspezifischer Unterschiede bei eindeutig bestimmbarem biologischem Geschlecht ist insbesondere die Studie von Kanda *et al.* (2015) von Relevanz, da sie auf einer klinischen Patientenklientel basiert und mit 590 untersuchten Individuen eine große Stichprobe umfasst. Die Autoren konnten im Rahmen ihrer Analyse signifikant höhere Prävalenzen von hypoglossalen Knochenbrücken bei Männern im Vergleich zu Frauen ($p = 0,011$; $OR = 1,67$) dokumentieren. Doppelte Hypoglossuskanäle traten bei Männern rechts in 10,6 % und links in 13,8 % der Fälle auf, bei Frauen in 4,5 % bzw. 10,7 %. Damit konnte laut Kanda *et al.* (2015) erstmals ein statistisch gesicherter Geschlechtsunterschied in der Häufigkeit der diskutierten anatomischen Variante gezeigt werden, während frühere Untersuchungen an Skelettpräparaten keine signifikanten Unterschiede ergaben. Ob dieser Befund populationsspezifisch ist oder allgemein für den Menschen gilt, bleibt laut den Autorinnen und Autoren offen (Kanda *et al.*, 2015).

Tatsächlich konnte bereits Corruccini (1974) einen vergleichbaren Befund erheben und damit die Annahme stützen, dass hyperostotische Normvarianten, wie etwa Hypoglossusbrücken,

bei männlichen Individuen häufiger auftreten. Grundlage seiner Untersuchung bildeten erwachsene Schädel der Terry Collection, einer umfassend dokumentierten Referenzserie rezenter Skelette mit eindeutig bestimmtem biologischem Geschlecht, Alter und ethnischer Zugehörigkeit. Für die europäisch abstammende Teilstichprobe aus 77 männlichen und 62 weiblichen Individuen konnte Corruccini (1974) nachweisen, dass die Hypoglossusbrücke bei männlichen Individuen mit 16,2 % gegenüber 13,1 % bei weiblichen Individuen signifikant häufiger auftrat. Auf Grundlage dieser Ergebnisse schlussfolgerte der Autor, dass inkonstant auftretende kraniale Merkmale geschlechtsspezifische Prävalenzen aufweisen können und daher bei morphologischen Analysen nicht geschlechtsunabhängig interpretiert werden sollten (Corruccini, 1974).

In der afrikanischstämmigen Teilstichprobe der Terry Collection, bestehend aus 99 männlichen und 83 weiblichen Individuen, zeigte sich jedoch kein signifikanter Geschlechtsunterschied in der Häufigkeit der Hypoglossusbrücke (8,6 % bei männlichen gegenüber 8,4 % bei weiblichen Individuen) (Corruccini, 1974). Dieses Ergebnis legt nahe, dass die geschlechtsspezifische Ausprägung hyperostotischer Schädelmerkmale möglicherweise populationsabhängigen Einflüssen unterliegen kann. Eine vergleichbare Beobachtung machten Lyrtzis *et al.* (2017) anhand einer griechischen Stichprobe, welche 73 männliche und 67 weibliche Schädel umfasste. In dieser Untersuchung konnten doppelt angelegte Hypoglossalkanäle bei 21,9 % der männlichen und 19,5 % der weiblichen Individuen festgestellt werden. Unter Bezugnahme auf Kaur *et al.* (2012) verweisen Lyrtzis *et al.* (2017) darauf, dass der Canalis nervi hypoglossi keinen Geschlechtsdimorphismus aufweise, und die Variabilität vielmehr auf populationsspezifische und umweltbedingte Einflüsse zurückzuführen sei.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Beobachtungen von Hanihara und Ishida (2001). Während Gehörgangsexostosen (benigne Knochenneubildungen des äußeren Gehörgangs) anhand der globalen Stichprobe signifikant häufiger bei männlichen Individuen vorkamen, zeigte sich für die knöchernen Ausprägungen des Canalis nervi hypoglossi kein geschlechtsspezifischer Unterschied. Nach Angaben der Autoren lassen sich die beobachteten Variationen dieser Merkmale, einschließlich hypoglossaler Brücken, in erster Linie ebenfalls durch geographische und populationsspezifische Unterschiede erklären, nicht jedoch durch geschlechtsspezifische Einflüsse (Hanihara und Ishida, 2001). Diese Befunde untermauern die Annahmen von Lyrtzis *et al.* (2017).

Aus dem vorliegenden Befund geht somit hervor, dass der Einfluss des biologischen Geschlechts auf die Ausbildung hypoglossaler Knochenbrücken bislang nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Einzelne Untersuchungen, insbesondere klinische Studien an größeren Kohorten und innerhalb einer definierten Ethnie, berichten zwar über höhere

Prävalenzen bei männlichen Individuen, dieser Zusammenhang ließ sich in anderen populationsbasierten Analysen jedoch nicht bestätigen.

5.7 Pathologische Exostosen als möglicher Störfaktor bei der Auszählung

Im Zusammenhang mit der Bewertung knöcherner Varianten im Bereich des Canalis nervi hypoglossi stellt sich die Frage, inwieweit das Vorhandensein von pathologischen Exostosen (z.B. reaktiver oder degenerativer Genese) die Auszählung beeinflussen könnten. Jainkittivong *et al.* (2000) beschrieben eine generell mit steigendem Alter zunehmende Prävalenz von Exostosen im Bereich der Mundhöhle und des Kiefers, was mit den vorliegenden Beobachtungen zum altersabhängigen Auftreten von Lingulae und Knochenbrücken am Hypoglossuskanal übereinstimmen und ein vermehrtes Auftreten im vorliegenden Untersuchungskollektiv (Alter > 60 Jahre) begünstigen könnte. Nery *et al.* (1977) zeigten darüber hinaus, dass das Auftreten von Exostosen am knöchernen Schädel zwischen verschiedenen Populationen variieren kann, was auf eine populationsabhängige Heterogenität derartiger Befunde hinweist.

Wird die Prävalenz pathologischer Exostosen gesondert betrachtet, zeigt sich, dass diese im Bereich der Schädelbasis überwiegend entlang von Duraduplikaturen oder extrakraniellen Bandstrukturen beschrieben werden (Roshni *et al.*, 2022), sodass ein gehäuftes Auftreten im Bereich des Canalis nervi hypoglossi als unwahrscheinlich einzuschätzen ist. Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Exostosen des Gehörgangs, der topographisch in unmittelbarer Nähe zum Hypoglossuskanal liegt, zu den häufigsten pathologischen Strukturveränderungen des Schädelknochens zählen (Kösling *et al.*, 2009), sind im Bereich des Hypoglossuskanals nach aktuellem Kenntnisstand bislang jedoch keine entsprechenden Befunde dokumentiert worden.

Darüber hinaus beschrieben Dodo (1980) sowie Hauser und De Stefano (1985) übereinstimmend, dass die knöchernen Brücken an ihrem untersuchten Material stets eine Verlaufsrichtung von hinten oben nach vorne unten aufwiesen. Dodo (1980) hob besonders hervor, dass besagte Brücken – sofern vorhanden – stets an der inneren Öffnung des Hypoglossuskanals ansetzten, jedoch nicht immer bis in den Kanal hineinreichten oder diesen vollständig durchzogen. Diese Beobachtungen decken sich mit unseren Ergebnissen, insbesondere hinsichtlich der Lokalisation der beobachteten Lingulae, die stets hinten oben oder vorne unten gelegen waren. Werden ausschließlich Lingulae und Brücken berücksichtigt, die diesem morphologischen Muster folgen, so können potenzielle Verwechslungen mit Exostosen und Knochensporen reduziert und deren Einfluss auf die Auszählung weiter minimiert werden.

5.8 Triplikaturen des Hypoglossuskanals – ein seltener Befund

Als seltene anatomische Ausprägung wird die Triplikatur des Hypoglossuskanals beschrieben. Schmidt (1975) dokumentierte in seinen Untersuchungen am Würzburger Untersuchungsgut eine Häufigkeit dreigeteilter Kanäle von 1 %. Diese Prävalenz entspricht unseren Beobachtungen, wobei in der vorliegenden Stichprobe eine dreifache Ausprägung lediglich an einer Schädelhälfte festgestellt werden konnte.

Die am Mainzer Untersuchungsgut (formaldehydfixiertes Feuchtpräparat) nachgewiesene Durchtrittsvariante ist insofern von besonderem wissenschaftlichem Interesse, als vergleichbare Befunde bislang überwiegend an mazerierten Schädeln beschrieben worden sind. Vor diesem Hintergrund gestaltete sich eine eindeutige Bestimmung des Kanalinhalts schwierig. Raghunath *et al.* (2015) beschrieben in einem Fallbericht eine beidseitige Dreiteilung des Canalis nervi hypoglossi und erwogen, dass der zusätzlich ausgebildete dritte Kanalanteil neben separierten Wurzelbündeln des Nervus hypoglossus entweder einer Emissarvene oder einem inkonstant auftretenden Ast der Arteria pharyngea ascendens isoliert als Durchtrittsstelle gedient haben könnte.

Die in unserer Sammlung beobachtete Dreiteilung des Hypoglossuskanals zeigte makroskopisch in allen drei Kanalanteilen nervale Strukturen. Diese Beobachtung verdeutlicht, dass der zwölfte Hirnnerv in seltenen Fällen durch drei voneinander getrennte knöcherne Kanäle verlaufen kann. Der Befund unterstreicht die ausgeprägte Variabilität der anatomischen Verhältnisse im Bereich der Schädelbasis.

Hinweise auf vaskuläre Komponenten, wie sie in der Literatur beschrieben sind (Gisel, 1956; Lang und Hornung, 1993; Neuhuber und Mysicka, 1980) konnten mit den angewandten Methoden im vorliegenden Präparat nicht sicher nachgewiesen werden.

5.9 Der Hypoglossuskanal im Kontext menschlicher Sprachevolution

Frühe Versuche, die Existenz menschlicher Sprache anhand anatomischer Merkmale, etwa einer kritischen Gehirngröße, dem Vorhandensein des Mentums oder einer ausdifferenzierten Linea mylohyoidea nachzuweisen, blieben erfolglos. Auch moderne Ansätze, wie die Rekonstruktion der oberen Atemwege von Neandertalern, lieferten Hypothesen zur Lautbildungsfähigkeit früher Hominiden, stoßen jedoch aufgrund fossiler Schäden und pathologischer Skelettveränderungen auf Kritik (Schepartz, 1993).

Kay *et al.* (1998) untersuchten in diesem Zusammenhang den Canalis nervi hypoglossi und formulierten zentrale Hypothesen zur Sprachfähigkeit früher Hominiden. Anhand ihrer Ergebnisse konnten sie zeigen, dass die Größe des Hypoglossuskanals beim modernen Menschen sowohl absolut als auch relativ (im Verhältnis zur Größe der Mundhöhle) signifikant größer ist als bei afrikanischen Menschenaffen. Frühere Hominiden wie der *Australopithecus* wiesen Kanäle auf, die der Größe heutiger Schimpansen entsprachen, während jüngere Homo-Arten bereits Kanalgrößen zeigten, die mit denen moderner Menschen vergleichbar waren (Kay *et al.*, 1998).

Ausgehend von der Annahme, dass die Größe des Hypoglossuskanals mit der Anzahl der Motoneuronen des N. hypoglossus korreliert, formulierten die Autoren die Hypothese, dass Menschenaffen wie der *Australopithecus* ein affenähnliches Sprachmuster beibehielten. Im Gegensatz dazu könnten nach Kay *et al.* (1998) frühe Homo-Arten, wie der *Homo heidelbergensis*, *Homo swanscombe* und der frühe *Homo sapiens* (Skhul 5), bereits vor über 300.000 Jahren sprachliche Fähigkeiten besessen haben, die mit denen moderner Menschen vergleichbar waren (Kay *et al.*, 1998).

Methodisch ist zu berücksichtigen, dass Kay *et al.* (1998) ihre Analyse auf einfache knöcherne Durchtrittsvarianten des Canalis nervi hypoglossi beschränkten und Varianten mit Lingula (Typ 2–4) oder gedoppelten Kanälen (Typ 5) ausschlossen. Am Mainzer Untersuchungsgut trat die einfache Variante jedoch lediglich in 34,7 % der Fälle auf, während Varianten mit einer superioren Lingula (31,7 %) oder vollständig geschlossenen ossären Brücken (26,7 %) ähnlich häufig zu beobachten waren. Der Vergleich der in dieser Studie erhobenen Prävalenzen mit einschlägigen Arbeiten (Dodo, 1980; Hanihara und Ishida, 2001; Hauser und De Stefano, 1985; Kanda *et al.*, 2015; Lang und Hornung, 1993; Paraskevas *et al.*, 2009) weist darauf hin, dass von einer erheblichen Variabilität der Kanalstrukturen auszugehen ist. Unter der Annahme vergleichbarer Häufigkeitsverteilungen erscheint es daher naheliegend, dass die von Kay *et al.* (1998) untersuchten fossilen Proben mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest teilweise in ihrer ursprünglichen Gestalt nicht der einfachen Standardvariante entsprachen.

Bereits hinreichend dokumentiert ist der Umstand, dass insbesondere Kanalvarianten an fossilen Funden, die ursprünglich durch diskret ausgeprägte Lingulae oder zarte Knochenbrücken charakterisiert waren, im Zuge taphonomischer Prozesse über längere Zeiträume hinweg wesentliche morphologische Merkmale einbüßen können (Guareschi *et al.*, 2025; Demuth *et al.*, 2022). Die Auswertung der vorliegenden Stichprobe zeigte, dass sich in 27 Fällen (26,7 %) vollständig geschlossene Knochenbrücken nachweisen ließen. Dabei wies die schmalste gemessene Knochenbrücke lediglich eine Breite von 1,1 mm auf. Diese Beobachtung verdeutlicht die außerordentliche Fragilität der untersuchten Strukturen im Laufe der Zeit. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Notwendigkeit, die Belastbarkeit der Datengrundlage sowie die interpretative Aussagekraft der von Kay *et al.* (1998) publizierten Studien im Kontext morphometrischer Analysen mit einer gewissen Zurückhaltung zu bewerten.

Denkbar ist folgend, dass Kay *et al.* (1998) fossile Nervenkanäle als einfache Durchtrittsvarianten klassifizierten, welche in der ursprünglichen Form Lingula(e) oder feine Knochenbrücken enthielten. Zudem bleibt offen, inwieweit die unterschiedlichen knöchernen Kanalausprägungen den äußeren Durchmesser des Hypoglossuskanals beeinflussen können. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind keine Studien bekannt, die diese Fragestellung adressierten, sodass einerseits die Klassifizierung im Untersuchungsgut von Kay *et al.* (1998) unsicher bleibt, während andererseits der Einfluss knöcherner Binnenstrukturen auf die Gesamtgröße des Canalis nervi hypoglossi ungeklärt ist.

Auch DeGusta *et al.* (1999) stellten die Schlussfolgerungen von Kay *et al.* (1998) kritisch infrage, wenngleich aus einer anderen Perspektive. In ihrer Untersuchung an menschlichen Kanal-Nerv-Paaren (n = 5) wurde sowohl die Fläche des Canalis nervi hypoglossi als auch die des N. hypoglossus im Längsschnitt analysiert. Zusätzlich wurde die Anzahl der im Nerv enthaltenen Axone mikroskopisch ausgezählt. Die Analyse ergab, dass weder zwischen der Fläche des Kanals und der des Nervs noch zwischen Nervengröße im Querschnitt und Anzahl der Axone eine signifikante Korrelation nachweisbar waren (DeGusta *et al.*, 1999).

Darüber hinaus stellten DeGusta *et al.* (1999) beim direkten Vergleich des Kanals zwischen dem rechten und linken Kanal der untersuchten Individuen (n = 37 Paare) fest, dass die Längsfläche durchschnittlich um 24 % variierte, wobei Differenzen von bis zu 100 % dokumentiert wurden. Ferner zeigte die Untersuchung, dass die Größe des Canalis nervi hypoglossi bei nichtmenschlichen Primaten, sowohl in absoluten Werten als auch in Relation zur Größe der Mundhöhle (nach Anwendung des von Kay *et al.* (1998) genutzten Bezugsfaktors), innerhalb des Messbereichs moderner Menschen lag (DeGusta *et al.*, 1999).

Jungers *et al.* (2003) ergänzten die Ergebnisse von DeGusta *et al.* um den Hinweis, dass die Überschneidung der Größe des Canalis nervi hypoglossi zwischen modernen Menschen und

Schimpansen, die keine artikulierte Sprache besitzen, selbst unter der Annahme einer idealen Korrelation zwischen Nerven- und Kanalgröße die Eignung der Kanalgröße als verlässlichen Indikator für die Fähigkeit zu gesprochener Sprache ausschließt. Diese Schlussfolgerung wird durch den Vergleich zwischen Gibbons und Siamangs gestützt. Obwohl beide Primatenarten ähnlich komplexe Vokalisierungsmuster zeigen, weisen lediglich Gibbons relative hypoglossale Kanalgrößen auf, die mit denen des Menschen vergleichbar sind (Geissmann, 2002; Jungers *et al.*, 2003).

Auf Grundlage eigener Daten sowie unter Einbeziehung der Messungen von DeGusta *et al.* (1999) kamen Jungers *et al.* (2003) zu dem Schluss, „dass die durchschnittlichen Unterschiede zwischen Menschen und Menschenaffen in der Größe des Kanals Unterschiede in der relativen Größe des vaskulären oder bindegewebigen Inhalts des Kanals widerspiegeln“ (Jungers *et al.*, 2003). Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung liefern empirische Anhaltspunkte, welche die durch Jungers und Mitarbeitende (2003) aufgestellte Hypothese stützen. Bei der Betrachtung der bindegewebigen Verhältnisse innerhalb des Hypoglossuskanals bei der einfachen Durchtrittsvariante und dem Auftreten höchstens einer knöchernen Lingula ($n = 71$) konnte am vorliegenden Untersuchungsgut festgestellt werden, dass die Nervenbündel im intrakanalären Segment in 78,9 % vereint und innerhalb einer gemeinsamen Durascheide verliefen. In 19,7 % verliefen die Nervenbündel zwar einander angelagert und gemeinsam dural umhüllt, jedoch erkennbar bindegewebig getrennt voneinander. In 1,4 % der Fälle fanden wir die Radices des N. hypoglossus in Gänze getrennt voneinander und in eigener Durascheide verlaufend.

Aus der geometrischen Beziehung zwischen Fläche und Umfang ($A = \pi r^2$; $U = 2\pi r$) lässt sich ableiten, dass zwei kleinere Kreisquerschnitte – wie sie etwa bei bindegewebig bzw. hirnhäutig getrennt voneinander verlaufenden Wurzelbündeln im Canalis nervi hypoglossi auftreten – insgesamt einen größeren Umfang aufweisen als ein einzelner, größerer Querschnitt im Falle einander angegliederter, gemeinsam dural umhüllter Radices. Vor diesem Hintergrund ist denkbar, dass die Organisation der Nervenbündel, insbesondere deren durale Umscheidung, im intrakanalären Hypoglossus-Segment, einen Einfluss auf die Gesamtgröße des Kanals ausüben kann. Dies könnte gemeinsam mit variabel ausgeprägten vaskulären Strukturen und möglichen taphonomischen Veränderungen der Morphologie innerhalb des diskutierten Neuroforamens zumindest teilweise erklären, weshalb morphometrische Unterschiede zwischen fossilen Funden und modernen Specimina nicht zwangsläufig mit der Funktionalität des Sprechapparats, beziehungsweise der Sprachfähigkeit korrelieren.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass ein wesentlicher Unterschied zwischen menschlicher Sprache und den Lautäußerungen nichtmenschlicher Primaten darin liegt, dass Menschen ihre Sprache erlernen, während die Lautäußerungen nichtmenschlicher Primaten überwiegend

angeboren sind und nur begrenzt erlernt werden können (Fitch, 2000). Zudem konnten Dunn und Smaers (2018) zeigen, dass beim Affen eine positive Korrelation zwischen der Größe des Vokalisations-Repertoires und dem Volumen der mit Lautbildung assoziierten kortikalen Areale, insbesondere des präfrontalen Kortex bestand. Allerdings fanden sie keinen Zusammenhang zwischen dem Umfang der Vokalisierung und der Größe des Nucleus nervi hypoglossi (Dunn und Smaers, 2018).

Vor diesem Hintergrund erscheint es naheliegend, dass das anatomische Korrelat der sprachlichen Evolution des Menschen in höher gelegenen Zentren zu finden ist, anstelle im Nucleus nervi hypoglossi, dem Nervus hypoglossus oder dem Canalis nervi hypoglossi.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung bietet mit 101 untersuchten Feuchtpräparaten aus der Sammlung des Instituts für Anatomie Mainz eine umfassende Übersicht zur Verteilung duraler und knöcherner Durchtrittsvarianten des Nervus hypoglossus. Aufgrund der erhobenen Daten kann für das hier betrachtete Körperspendekollektiv (deutsch, Alter ≥ 65 Jahre) schlussgefolgert werden:

1. Die kraniale Dura wird mit 65,3 % am häufigsten durch zwei voneinander getrennte Bündel des Nervus hypoglossus pro Seite perforiert
2. Bei einem Vorliegen eines doppelten Duradurchtritts findet sich zwischen den zwei Durapori ein mittlerer Abstand von $4,7 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$
3. Der knöcherne Durchtritt (Canalis nervi hypoglossi) verteilt sich maßgeblich auf 3 Varianten: Ein einfacher Kanal in 34,7 %, eine superiore Lingula in 31,7 % und eine geschlossene Knochenbrücke in 26,7 %
4. Eine geschlossene Knochenbrücke weist eine mittlere Breite von $3,9 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$ auf
5. Bei einem kombinierten Auftreten eines doppelten Duradurchtritts und einer geschlossener Knochenbrücke besteht eine positive Korrelation zwischen dem Abstand der Durapori und der Breite der Knochenbrücke
6. Die Wahrscheinlichkeit, auf einen geteilten Canalis nervi hypoglossi zu stoßen ist auf der linken Seite höher und steigt mit zunehmendem Alter des untersuchten Individuums

Darüber hinaus konnte in der vorliegenden Arbeit eine Triplikatur des Canalis nervi hypoglossi ausführlich dokumentiert werden. Während vergleichbare Varianten in der Literatur bislang überwiegend anhand mazerierter Schädel beschrieben und Aussagen zum Inhalt der einzelnen Kanalanteile hypothetisch getroffen wurden, konnten wir nachweisen, dass in allen drei Kanalanteilen Nervenbündel verliefen.

Zusammenfassend unterstreichen die erhobenen Befunde, dass für die sichere Durchführung neurochirurgischer Eingriffe an der Schädelbasis nicht nur die Kenntnis anatomischer Varianten, sondern auch das Verständnis ihrer möglichen Abhängigkeiten wichtig ist, um operative Komplikationen zu vermeiden.

7 Literaturverzeichnis

Ari I, Kurt MA, Oygucu IH, Sendemir E (2005) Variations in the bridging trait of the hypoglossal canal in 13th century Byzantine skulls. *Int J Osteoarchaeol*, 15(2):140–145.

Bademci G, Yasargil MG (2006) Microsurgical anatomy of the hypoglossal nerve. *J Clin Neurosci*, 13:841–847.

Benninghoff A, Drenckhahn D (2004) *Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie*. 16. Aufl., Band 2. Urban & Fischer, München.

Bhuller A, Sañudo JR, Choi D, Abrahams PH (1998) Intracranial course and relations of the hypoglossal nerve: an anatomic study. *Surg Radiol Anat*, 20:109–112.

Corruccini RS (1974) An examination of the meaning of cranial discrete traits for human skeletal biological studies. *Am J Phys Anthropol*, 40(3):425–446.

DeGusta D, Gilbert WH, Turner SP (1999) Hypoglossal canal size and hominid speech. *Proc Natl Acad Sci USA*, 96(4):1800–1804.

Del Bove A, Menéndez L, Manzi G, Moggi-Cecchi J, Lorenzo C, Profico A (2023) Mapping sexual dimorphism signal in the human cranium. *Sci Rep*, 13:16847.

Demuth OE, Benito J, Tschopp E, Lautenschlager S, Mallison H, Heeb N, Field DJ (2022) Topology-based three-dimensional reconstruction of delicate skeletal fossil remains and the quantification of their taphonomic deformation. *Front Ecol Evol*, 10:828006.

Dodo Y (1980) Appearance of bony bridging of the hypoglossal canal during the fetal period. *J Anthrop Soc Nippon*, 88(3):229–238.

Dunn JC, Smaers JB (2018) Neural correlates of vocal repertoire in primates. *Front Neurosci*, 12:534.

Fitch WT (2000) The evolution of speech: a comparative review. *Trends Cogn Sci*, 4(7):258–267.

Geissmann T (2002) Duet splitting and the evolution of gibbon song. *Biol Rev*, 77:57-76.

Genger P (2018) The British Colonization of Australia: An Exposé of the Models, Impacts and Pertinent Questions. *Peace Confl. Stud.*, 25(1):Art. 4.

Gerlach J, Jensen H-P, Spuler H, Viehweger G (1962) Die Persistenz der Arteria primitiva hypoglossica. *Arch Psychiatr Nervenkr*, 203, 164–172.

Gisel A (1956) Die Venen im Canalis nervi hypoglossi. *Z Anat Entwicklungsgesch*, 119:257–258.

Godtfredsen E (1947) Ophthalmo-neurological symptoms in connection with malignant nasopharyngeal tumours. *Br J Ophthalmol*, 31(2):78–100.

Gray H, Lewis WH (1918) *Anatomy of the Human Body*. 20. Aufl. Lea & Febiger, Philadelphia und New York.

Guareschi EE, Nicholls PK, Tobe SS, Magni PA (2025) Taphonomy and diagenesis of submerged bone: an experimental approach. *Forensic Sci Int*, 370:112416.

Guarna M, Lorenzoni P, Franci D, Aglianò M (2023) Hypoglossal canal: an osteological and morphometric study on a collection of dried skulls in an Italian population: clinical implications. *Eur J Med Res*, 28:501.

Hanihara T, Ishida H (2001) Frequency variations of discrete cranial traits in major human populations. III. Hyperostotic variations. *J Anat*, 199(3):251–272.

Hanihara T, Ishida H, Dodo Y (1998) Os zygomaticum bipartitum: frequency distribution in major human populations. *J Anat*, 192(4):539–555.

Hauser G, De Stefano GF (1985) Variations in form of the hypoglossal canal. *Am J Phys Anthropol*, 67(1):7–11.

Hesse C (2013) *USA – Geschichte, Wirtschaft, Gesellschaft*. Überarbeitete Neuauflage. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb), Bonn.

Iaconetta G, Solari D, Villa A, Castaldo C, Gerardi RM, Califano G, Montagnani S, Cappabianca P (2018) The hypoglossal nerve: anatomical study of its entire course. *World Neurosurg*, 109:e486–e492.

Ingelmark I (1947) Über das craniovertebrale Grenzgebiet beim Menschen. *Acta Anat (Suppl 3)*:1–108.

Jainkittivong A, Langlais RP (2000) Buccal and palatal exostoses: prevalence and concurrence with tori. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 90(1):48–53.

Jungers WL, Pokempner AA, Kay RF, Cartmill M (2003) Hypoglossal canal size in living hominoids and the evolution of human speech. *Hum Biol*, 75(4):473–484.

Kanda T, Kiritoshi T, Osawa M, Toyoda K, Oba H, Kotoku J, Kitajima K, Furui S (2015) The incidence of double hypoglossal canal in Japanese: evaluation with multislice computed tomography. *PLoS One*, 10(2):e0118317.

Karasu A, Cansever T, Batay F, Sabanci PA, Al-Mefty O (2009) The microsurgical anatomy of the hypoglossal canal. *Surg Radiol Anat*, 31(4):363–367.

Kay RF, Cartmill M, Balow M (1998) The hypoglossal canal and the origin of human vocal behavior. *Proc Natl Acad Sci USA*, 95(4):5417–5419.

Kolbe JJ, Leal M, Schoener TW, Spiller DA, Losos JB (2012) Founder effects persist despite adaptive differentiation: a field experiment with lizards. *Science*, 335(6072):1086–1089.

Kösling S, Neumann K, Brandt S (2009) CT und MRT bei intrinsischen raumfordernden Läsionen der knöchernen Schädelbasis. *Radiologe*, 49(7):598–607.

Krishan K, Chatterjee PM, Kanchan T, Kaur S, Baryah N, Singh RK (2016) A review of sex estimation techniques during examination of skeletal remains in forensic anthropology casework. *Forensic Sci Int*, 261:165.e1–165.e8.

Kumar S, Verma R, Rai AM, Mehra RD (2017) Morphological and morphometric analysis of hypoglossal canal in North Indian dry skulls and its significance in cranial base surgeries. *J Clin Diagn Res*, 11(3):AC08–AC12.

Lang J (Hrsg.), Lanz T von (Begr.) (1985) *Praktische Anatomie: ein Lehr- und Hilfsbuch der anatomischen Grundlagen ärztlichen Handelns*. Bd. 1, Teil 1: Kopf; Teil A: Übergeordnete Systeme. Springer, Berlin.

Lang J, Hornung G (1993) Über den Canalis hypoglossi und seinen Inhalt beim posterolateralen Zugang zur petroclivalen Region. *Neurochirurgia*, 36:75–80.

Lillie RD (1917) Variations of the canalis hypoglossi. *Anat Rec*, 13(3):131–144.

Lynnerup N, Schulz M, Madelung A, Graw M (2006) Diameter of the human internal acoustic meatus and sex determination. *Int J Osteoarchaeol*, 16(2):118–123.

Lyrtzis Ch, Piagkou M, Gkioka A, Anastasopoulos N, Apostolidis S, Natsis K (2017) Foramen magnum, occipital condyles and hypoglossal canals morphometry: anatomical study with clinical implications. *Folia Morphol*, 76(3):446–457.

Muthukumar N, Swaminathan R, Venkatesh G, Bhanumathy SP (2005) A morphometric analysis of the foramen magnum region as it relates to the transcondylar approach. *Acta Neurochir (Wien)*, 147(8):889–895.

Niel M, Marker DL, Hens SM (2019) Retrosigmoid prevalence and characterization of occipital “transverse grooves” (sulcus transversus) in a large osteoanthropological sample. *Forensic Sci. Int.*, 301:109916.

Nery EB, Corn H, Eisenstein IL (1977) Palatal exostosis in the molar region. *J Periodontol*, 48(11):663–667.

Neuhuber W, Mysicka A (1980) Afferent neurons of the hypoglossal nerve of the rat as demonstrated by horseradish peroxidase tracing. *Anat Embryol*, 158:349–360.

O’Rahilly R, Müller F (1984) The early development of the hypoglossal nerve and occipital somites in staged human embryos. *Am J Anat*, 169(3):237–257.

Ossenberg NS (1970) The influence of artificial cranial deformation on discontinuous morphological traits. *Am J Phys Anthropol*, 33(4):357–372.

Ossenberg NS (1974) An examination of the meaning of cranial discrete traits for human skeletal biological studies. *Am J Phys Anthropol*, 40(1):45–53.

Palmer AR, Strobeck C (2003) Fluctuating asymmetry analyses revisited. In: Polak M (ed) *Developmental Instability: Causes and Consequences*. Oxford Univ Press, 279–319.

Paraskevas GK, Tsitsopoulos PP, Papaziogas B, Kitsoulis P, Spanidou S, Tsitsopoulos P (2009) Osseous variations of the hypoglossal canal area. *Med Sci Monit*, 15(3):BR75–BR83.

Pearson AA (1939) The hypoglossal nerve in human embryos. *J Comp Neurol*, 71:21–39.

Raghunath M, Singh R, Shende N, Pandey S (2015) Bilateral internal triplication of hypoglossal canal. *Int J Health Sci Res*, 5(7):445–447.

Randal Bollinger R, Barbas AS, Bush EL, Lin SS, Parker W (2007) Biofilms in the large bowel suggest an apparent function of the human vermiform appendix. *J Theor Biol*, 249(4):826–831.

Sadashiv R, Managutti S, Kulkarni V, Kulkarni AV, Dixit U (2023) Morphological measurements of innominate foramina and bony spurs along the base of sphenoid as a potential risk factor for neurovascular entrapment, radiological interpretation and surgical access. *Malays J Med Sci*, 30(2):90–95.

Schepartz LA (1993) Language and modern human origins. *Yearb Phys Anthropol*, 36(6):91–126.

Schipper J, Albrecht A, Klenzner T, Wagenmann M, Schaumann K, Hänggi D, Cornelius JF (2022) Interdisziplinäre Chirurgie der zentralen Schädelbasis – aktueller Stand. *HNO*, 70(1):24–32.

Som PM, Naidich TP (2013) Development of the skull base and calvarium: an overview of the progression from mesenchyme to chondrification to ossification. *Neurographics*, 3(4):169–184.

Standring S (2016) *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 41. Ed. Elsevier, London.

Starck D (1982) *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere auf evolutionsbiologischer Grundlage*. Band 3: Organe des aktiven Bewegungsapparates, der Koordination, der Umweltbeziehung, des Stoffwechsels und der Fortpflanzung. Springer, Berlin, Heidelberg.

Takada K, Sakuda M, Yoshida K, Kawamura Y (1980) Relations between tongue volume and capacity of the oral cavity proper. *J Dent Res*, 59(12):2026–2031.

Torgersen, J. (1951) Asymmetry and skeletal maturation. *Acta Radiol*, 36(6):521–523.

Tubbs RS, Shoja MM, Loukas M (2016) Bergman's Comprehensive Encyclopedia of Human Anatomic Variation. 1st edition. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.

Wai YZ, Chong YY, Dusa NM, Lai YP, Lim LT (2022) Godfredsen syndrome – recurrent clival chondrosarcoma with 6 years follow up: a case report and literature review. BMC Neurol, 22:134.

Walker PL (2008) Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. Am J Phys Anthropol, 136(1):39–50.

Węgiel A, Zielinska N, Głowacka M, Olewnik Ł (2024) Hypoglossal nerve neuropathies—analysis of causes and anatomical background. Biomedicines, 12(4):864.

Weigner K (1912) Über die Assimilation des Atlas und über die Variationen am Os occipitale beim Menschen. Anat Hefte I Abt, 45(1):1–115.

Wen HT, Rhoton AL Jr, Katsuta T, de Oliveira E (1997) Microsurgical anatomy of the transcondylar, supracondylar, and paracondylar extensions of the far-lateral approach. J Neurosurg, 87(4):555–585.

Wysocki J, Kobryń H, Bubrowski M, Kwiatkowski J, Reymond J, Skarżyńska B (2004) The morphology of the hypoglossal canal and its size in relation to skull capacity in man and other mammal species. Folia Morphol, 63(1):11–17.

8 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt [REDACTED]
[REDACTED], für die stets konstruktiven Gespräche, seine Geduld und seinen unermüdlichen Einsatz. Lieber [REDACTED], ganz besonders möchte ich dir für die Zusammenarbeit auf Augenhöhe danken.

Herrn [REDACTED] für die Möglichkeit zur Promotion am Institut für Anatomie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

Meiner lieben Frau [REDACTED] und unserer Tochter [REDACTED] für ihre Geduld, ihre Unterstützung und die zahlreichen persönlichen Entbehrungen.

Meiner Familie von Herzen. Meiner Mutter, meinem Vater, meinem Bruder und meiner Schwester für ihre stetige Ermunterung und Begleitung auf meinem Weg.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Anatomie Mainz für ihre kompetente Unterstützung und fachliche Betreuung während der Präparation.

Diese Arbeit ist den Körperspenderinnen und Körperspendern gewidmet, deren letztes Geschenk diese Arbeit ermöglicht hat und für Forschung und Lehre unverzichtbar ist – in ehrendem Gedenken.

9 Tabellarischer Lebenslauf

