

**Computertomographisch dreidimensional-  
anatomische Messdatenquantifizierung an der  
Halswirbelsäule zur Anwendung bei operativen  
Verfahren zur Wirbelsäulenstabilisierung**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

**Roya Alexandra Elvert, geb. Schildgen**

aus Köln

2020

Angefertigt mit der Genehmigung  
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Herr PD Dr. med. Koroush Kabir
2. Gutachter: Herr Prof. Dr. Stephan Baader

Tag der Mündlichen Prüfung: 02.10.2020

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie  
Direktor: Herr Prof. Dr. med. Dieter Christian Wirtz

*Für meine Eltern*





## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	8
<b>1. Einleitung</b> .....	11
1.1 Anatomie der Wirbelsäule .....	12
1.1.1 Aufbau der Wirbelsäule.....	12
1.1.2 Aufbau eines Wirbels .....	13
1.1.3 Bandapparat der Wirbelsäule.....	14
1.1.4 Anatomie der Halswirbelsäule.....	16
1.1.5 Präoperative Bildgebung der Halswirbelsäule .....	21
1.2 Instabilität der Halswirbelsäule.....	22
1.2.1 Verletzungen und Instabilität .....	23
1.2.1.1 Frakturen der Halswirbelsäule.....	23
1.2.1.2 Pathologische Frakturen .....	24
1.2.1.3 Einteilung der Frakturen.....	25
1.2.2 Diskoligamentäre Verletzungen .....	27
1.2.3 Stabilität oder Instabilität von Wirbelsäulenverletzungen.....	27
1.2.4 Kongenitale Malformationen .....	28
1.2.5 Postoperative Instabilität .....	28
1.2.6 Neoplasien.....	28
1.2.7 Entzündliche Prozesse .....	29
1.2.8 Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule .....	29
1.2.9 Rheumatoide Arthritis .....	30
1.3 Therapie mittels Pedikel- und Laminaschrauben.....	30
1.3.1 Pedikelschrauben .....	31
1.3.1.1 Konstruktionsaufbau .....	31
1.3.1.2 Operationstechnik .....	31
1.3.1.3 Historische Entwicklung der Pedikel-Chirurgie .....	32
1.3.2 Laminaschrauben und weitere Systeme .....	34
1.3.3 Komplikationen .....	34
1.4 Fragestellung und Zielsetzung .....	35
<b>2. Material und Methoden</b> .....	37

2.1 Patientenkollektiv .....	37
2.2 Methodischer Hintergrund und Datenerfassung .....	37
2.3 Statistische Methoden .....	37
2.4 Messtechnik .....	38
2.4.1 Messung HWK 2 .....	40
2.4.2 Messung HWK 3-7 .....	56
2.4.3 Anmerkungen .....	64
2.4.4 Degeneration .....	65
<b>3. Ergebnisse</b> .....	<b>67</b>
3.1 Übersicht der Messparameter .....	67
3.2 Patientenkollektiv .....	68
3.3 Geschlechtsunterschiede .....	69
3.4 Messergebnisse .....	69
3.4.1 C2-spezifische Parameter .....	69
3.4.2 Wirbelkörperhöhe .....	70
3.4.3 Wirbelkörperlänge und -breite .....	73
3.4.4 Messparameter im Seitenvergleich .....	76
3.4.5 Laminaparameter .....	77
3.4.6 Pedikelparameter .....	82
3.4.7 Massa lateralis Parameter .....	88
3.5 Degeneration der Halswirbelsäule .....	91
3.6 Durchgängig kortikaler Aufbau .....	95
3.7 Platzierbarkeit von Lamina- und Pedikelschrauben .....	96
3.7.1 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz ..	97
3.7.2 Kontinuierliche C2-Pedikelkortikalis: Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz .....	100
3.7.3 Platzierbarkeit einer 4,0 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz	101
3.7.4 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz	103
3.7.5 Platzierbarkeit einer 4,0 mm Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz	107
3.7.6 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschraube ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	109

3.7.7 Spondylarthrose: Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikel- oder Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz.....	111
<b>4. Diskussion</b> .....	114
4.1 Patientenkollektiv .....	114
4.2 Geschlechtsunterschiede.....	114
4.3 Messparameter im Seitenvergleich .....	115
4.4 Lamina- und Pedikelquerschnitt.....	116
4.5 Durchgängig kortikaler Aufbau.....	117
4.6 Anatomische Voraussetzungen für eine Schraubenplatzierung .....	117
4.7 Platzierbarkeit von Lamina- und Pedikelschrauben.....	119
4.7.1 Platzierbarkeit einer Pedikelschraube .....	120
4.7.2 Platzierbarkeit einer Laminaschraube .....	120
4.7.3 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschraube ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	121
4.8 Einflussfaktoren auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung .....	121
4.8.1 Einfluss des Alters auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung .....	122
4.8.2 Einfluss des Geschlechtes auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung ...	123
4.8.3 Einfluss der Spondylarthrose auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung	124
4.8.4 Einfluss der C2-Pedikelkortikalis auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung.....	124
4.9 Limitationen .....	125
4.9.1 Studienmodell .....	125
4.9.2 Messtechnik.....	125
4.9.3 Voraussetzungen und Einflussfaktoren einer Schraubenplatzierung.....	126
4.9.4 Anatomische Verhältnisse.....	127
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	128
<b>6. Abbildungsverzeichnis</b> .....	129
<b>7. Tabellenverzeichnis</b> .....	134
<b>8. Literaturverzeichnis</b> .....	137
<b>9. Anhang</b> .....	150
<b>10. Danksagung</b> .....	158

## Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
Artt.	Articulationes
CT	Computertomographie
C1	Halswirbel 1
C2	Halswirbel 2 usw.
d	Durchmesser
HWK	Halswirbelkörper
HWS	Halswirbelsäule
L1	Lendenwirbel 1
L5	Lendenwirbel 5
Ligg.	Ligamenta
mean	Mittelwert
med	Median
min	minimaler Wert
max	maximaler Wert
MRT	Magnetresonanztomographie
n	Anzahl
Procc.	Processus (Plural)
S1	Sakralwirbel 1
S5	Sakralwirbel 5
se	Standardfehler
sd	Standardabweichung
Standardabw.	Standardabweichung
Th1	Thorakalwirbel 1
Th12	Thorakalwirbel 12
WK	Wirbelkörper

## Messparameter

C2HmD	Wirbelkörperhöhe C2 mit Dens
C2HoD	Wirbelkörperhöhe C2 ohne Dens
C2DBk	Densbreite koronar (Densbasis)
C2DBs	Densbreite sagittal (Tiefe)
C3WHv	Wirbelkörperhöhe C3 ventral
C3WHz	Wirbelkörperhöhe C3 zentral
C3WHd	Wirbelkörperhöhe C3 dorsal
C3DLs	Deckplattenlänge C3 (sagittaler Durchmesser)
C3DBt	Deckplattenbreite C3 (transversaler Durchmesser)
C3WLzs	Wirbelkörperlänge C3 zentral (sagittaler Durchmesser)
C3WBzt	Wirbelkörperbreite C3 zentral (transversaler Durchmesser)
C2BLs	Bodenplattenlänge C2 (sagittaler Durchmesser)
C2BBt	Bodenplattenbreite C2 (transversaler Durchmesser)
C2LLr	Laminallänge C2 rechts
C2LBrka	Laminabreite C2 rechts (äußere Kortikalis)
C2LBrki	Laminabreite C2 rechts (innere Kortikalis)
C2LWr	Laminawinkel C2 rechts
C2LHrka	Laminahöhe C2 rechts (äußere Kortikalis)
C2LHrki	Laminahöhe C2 rechts (innere Kortikalis)
C2PLr	Pedikellänge C2 rechts
C2PBrka	Pedikelbreite C2 rechts (äußere Kortikalis)
C2PBrki	Pedikelbreite C2 rechts (innere Kortikalis)
C2PWr	Pedikelwinkel C2 rechts
C2PHrka	Pedikelhöhe C2 rechts (äußere Kortikalis)
C2PHrki	Pedikelhöhe C2 rechts (innere Kortikalis)
C2PKr	Pedikelkortikalis C2 rechts
C2MLFr	Massa lateralis Fläche C2 rechts
C2MLLrsag	Massa lateralis Länge C2 rechts (sagittaler Durchmesser)
C2MLLrt	Massa lateralis Länge C2 rechts (transversaler Durchmesser)
C2MLLrsch	Massa lateralis Länge C2 rechts (schräger Durchmesser)

C2MLHr      Massa lateralis Höhe C2 rechts

Die Messparameter-Abkürzungen sind exemplarisch dargestellt. Die Abkürzungen ergeben sich analog für C3 bzw. C4 bis C7. Die Darstellung beschränkt sich auf die Angabe der rechtsseitigen Parameter. Die linke Seite wird durch den Kleinbuchstaben „l“ statt des Buchstabens „r“ gekennzeichnet. Ist keine Seitenangabe vorhanden, bezeichnet der Parameter eine zusammengefasste Betrachtung von links und rechts. Beispiele:

C2LLr      Laminalänge C2 rechts

C2LLl      Laminalänge C2 links

C2LL      Laminalänge C2

## 1. Einleitung

In den Industrienationen stellen Schmerzen im Schulter-Nackebereich mit einer Lebenszeitprävalenz von ca. 67 % ein häufiges Krankheitsbild dar (Côté et al. 1998). Die möglichen Ursachen für Schmerzen sind degenerative Veränderungen der Halswirbelsäule (HWS), wie die zervikale Osteochondrose oder eine Facettengelenksarthrose. Je nach Art und Ausmaß der vorliegenden Pathologie, kann nach Versagen der konservativen Therapie eine chirurgische Intervention indiziert sein. Als weitere Indikationen zur chirurgischen Therapie gelten Tumore, Spondylodiszitiden und Verletzungen der HWS (Bambakidis et al., 2005).

Zur operativen Stabilisierung einer Wirbelsäulenpathologie können unter anderem Lamina- und Pedikelschrauben verwendet werden. Die genaue Kenntnis der anatomischen Gegebenheiten ist dabei entscheidend für die Planung und Durchführung einer Instrumentierung, sodass zur optimalen Vorbereitung in der Regel eine präoperative Bildgebung, idealerweise in Form einer Computertomographie (CT) und/oder Kernspintomographie, erfolgt.

In der vorliegenden Arbeit werden anhand von dreidimensional rekonstruierten computertomographischen Bildern Messdaten verschiedener Wirbelsäulenparameter erhoben. Es wird ein standardisiertes Messkonzept entwickelt, das sich auf andere Wirbelsäulenabschnitte übertragen lässt und diese so miteinander vergleichbar macht. Die Untersuchung liefert statistische Daten definierter Wirbelsäulenparameter eines unselektierten Polytrauma-Patientenkollektivs der Universitätsklinik Bonn als Orientierungshilfe für chirurgische Eingriffe an der Halswirbelsäule. Es wird speziell untersucht, wie häufig eine Lamina- beziehungsweise Pedikelschraubeneinbringung unter der Voraussetzung ausreichender Höhen- und Breitendurchmesser der betrachteten Struktur möglich ist und ob Faktoren wie Alter, Geschlecht, degenerative Veränderungen oder spezielle anatomische Formen der Pedikel die Möglichkeit einer Schraubenplatzierung beeinflussen.

## 1.1 Anatomie der Wirbelsäule

### 1.1.1 Aufbau der Wirbelsäule

Die knöcherne Wirbelsäule (Columna vertebralis), das Achsskelett des menschlichen Körpers, dient der Gewährleistung der Rumpfstabilität und der Ermöglichung dynamischer Bewegungen, wie dem aufrechten Gang und statischen Körperhaltungen (Waxenbaum et al., 2018). Als verbindende situationsadaptive Struktur zwischen den entgegengesetzten Kräften des Muskelzuges und der Schwerkraft erfüllt sie mehrere wichtige Funktionen. So bildet die Wirbelsäule das Schutz- und Leitorgan für das Rückenmark. Von kranial nach kaudal bilden fünf Abschnitte einen funktionellen Verband (Abbildung 1): Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule bilden den beweglicheren zervikalen, thorakalen und lumbalen Teil der Wirbelsäule, während im Beckenbereich die Sakralwirbelsäule (Os sacrum) sowie das den kaudalen Abschluss der Wirbelsäule bildende Steißbein (Os coccygis) überwiegend statische Aufgaben erfüllen. Die Halswirbelsäule umfasst sieben Wirbel (C1-C7), die Brustwirbelsäule besteht aus zwölf Wirbeln (Th1-Th12). Zur Lendenwirbelsäule zählen die kaudal an die Brustwirbelsäule angrenzenden fünf Wirbel (L1-L5). Die Sakralwirbelsäule wird in der Regel durch fünf Kreuzbeinwirbel (S1-S5) gebildet, die nach der Geburt zu einem Knochen verschmelzen. Das Steißbein bildet mit drei bis fünf rudimentären Wirbeln den kaudalen Abschluss der Wirbelsäule. Als anatomische Variante kommen Übergangswirbel im Übergangsbereich zwischen der Lenden- und der Sakralwirbelsäule vor. Diese ergeben sich dadurch, dass während der Ausreifung des Achsskeletts durch unterbliebenes Verschmelzen mit den kaudalen Sakralwirbeln eine Lumbalisation des 1. Sakralwirbels oder durch ein zusätzliches Verschmelzen mit dem Os sacrum eine Sakralisation des 5. Lendenwirbels stattgefunden hat. Aus Somiten differenzierte mesenchymale Sklerotomzellen bilden die Grundlage für die embryologische Entwicklung der Wirbelsäule (Töndury, 1974). Bei abweichenden embryologischen Entwicklungen entstehen anatomische Varianten oder Pathologien wie beispielsweise die Spina bifida durch ein Ausbleiben des Verschlusses der posterioren Wirbelbögen (Mitchell et al., 2004).

Während der Evolution erfolgte eine Anpassung der Wirbelsäule an die aufrechte Fortbewegung, sodass die heute im Regelfall Doppel-S-förmige Krümmung in der Sagittalebene entstand. Im Normalfall besteht eine Lordose im Bereich der Hals- und



Lendenwirbelsäule sowie im lumbosakralen Übergangsbereich gegenüber einer Kyphose im Bereich der Brust-, Sakral- und Kokzygealwirbelsäule (Loder, 2001). Diese physiologischen Krümmungen der Wirbelsäule dienen dem dynamischen Ausgleich der auf den Körper einwirkenden Druck- und Stoßkräfte.



**Abb. 1:** Seitenansicht der Wirbelsäule

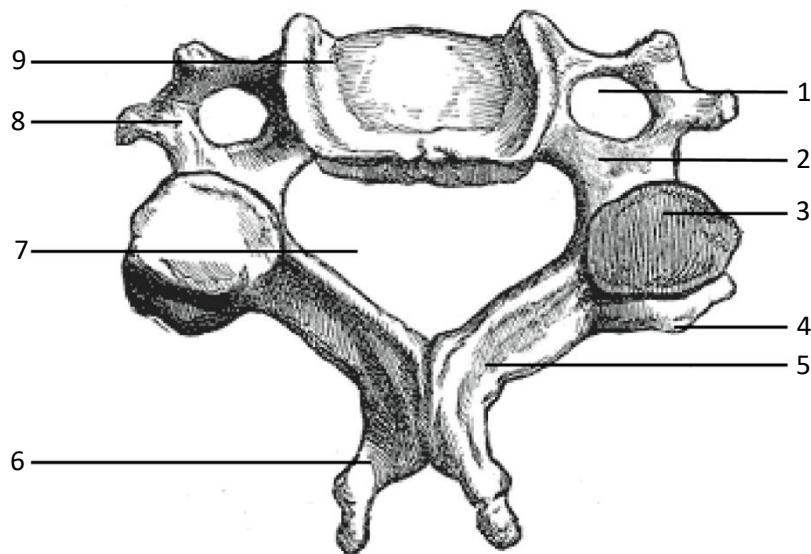
(Quelle: Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*, Fig. 111, 1918)

1: Atlas (1. Halswirbel), 2: Axis (2. Halswirbel), 3: erster Thorakalwirbel,  
4: erster Lendenwirbel, 5: Sakralwirbelsäule, 6: Kokzygealwirbelsäule

### 1.1.2 Aufbau eines Wirbels

Ein Wirbel setzt sich aus dem Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*), dem Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*) und speziellen Fortsätzen (*Processus*) zusammen (Abbildung 2). Der Wirbelbogen besteht aus der wirbelkörpernahen Bogenwurzel, dem Pedikel (*Pediculus arcus vertebrae*) und der wirbelkörperfernen *Lamina arcus vertebrae* (*Lamina*). Wirbelbogen und Wirbelkörper bilden das *Foramen vertebrale*, in dem das Rückenmark verläuft. Dorsal liegt der Dornfortsatz (*Processus spinosus*). Vier Gelenkfortsätze, die *Processus articulares*, bilden die Verbindung zu den benachbarten Wirbeln (Waxenbaum et al., 2018). Seitliche Querfortsätze, die *Processus transversi*, dienen als Ansatzpunkt für Muskeln und Bänder. Im Bereich der Lendenwirbelsäule sind die *Processus transversi* besonders kräftig ausgeprägt und werden als *Processus costales* bezeichnet. Die

kranialen und kaudalen Abschlussplatten der Wirbelkörper werden als Deck- und Bodenplatten bezeichnet. Der Aufbau und die Form des Wirbels variieren je nach Wirbelsäulenabschnitt. Im Folgenden werden einige charakteristische Merkmale für die jeweiligen Abschnitte exemplarisch genannt. Als Anpassung an die zunehmende Belastung durch das Körpergewicht nimmt die Wirbelkörpergröße von kranial nach kaudal vom ersten Halswirbelkörper (C1) bis zum fünften Lendenwirbelkörper (L5) zu (Waxenbaum et al., 2018). Die Foramina vertebrales hingegen verschmälern sich nach kaudal, da der Rückenmarksquerschnitt abnimmt. Die Brustwirbel verfügen über verkorpelte Gelenkflächen, an denen die Rippen artikulieren.



**Abb. 2:** Halswirbel von kranial

(Quelle: Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*, Fig. 84, 1918)

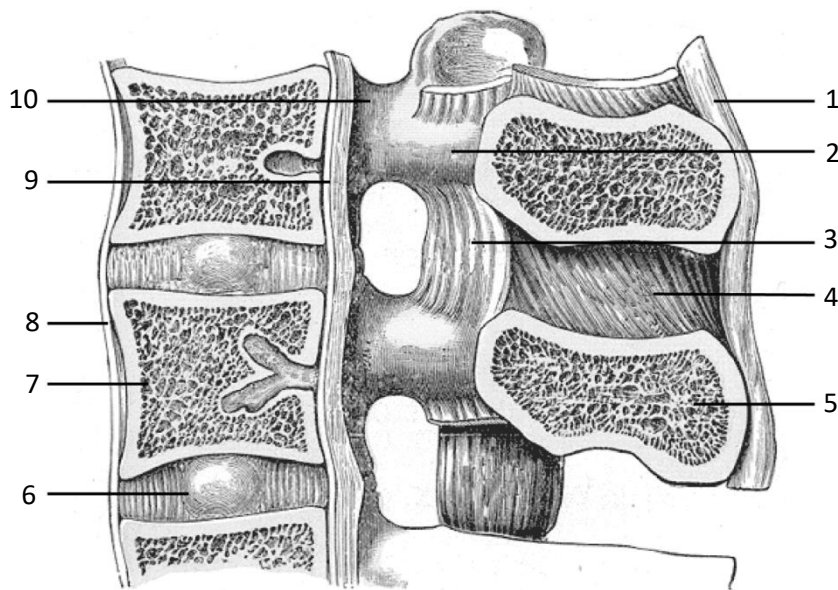
1: Foramen transversarium, 2: Pedikel, 3: Processus articularis superior, 4: Processus articularis inferior, 5: Lamina, 6: Processus spinosus, 7: Foramen vertebrale, 8: Processus transversus, 9: Corpus vertebrae

### 1.1.3 Bandapparat der Wirbelsäule

Zur effizienten Abfederung von Zug- und Scherkräften sowie der axialen Belastung durch das Körpergewicht wird die knöcherne Wirbelsäule durch die Bandscheiben unterstützt, die zwischen zwei Wirbelkörpern liegen (Kusumi, 2010). Zwischen Atlas und Axis ist keine Bandscheibe angelegt.

Die Bandscheibe (Discus intervertebralis) besteht aus einem zentralen Gallertkern (Nucleus pulposus) und einem ihn umgebenden kollagenen zugfesten Faserring (Anulus fibrosus). Der Anulus fibrosus zeigt einen charakteristischen konzentrischen, lamellären Aufbau, um der belastungsbedingten Expansion des Nucleus pulposus entgegenzuwirken (Kusumi, 2010).

Ein ausgeprägter Bandapparat unterstützt die Wirbelsäulenstabilität (Abbildung 3). Dieser besteht aus dem ventral der Wirbelkörper verlaufenden Ligamentum longitudinale anterius und dem dorsalen Pendant, dem Ligamentum longitudinale posterius, das an der Rückseite der Wirbelkörper verläuft. Sie wirken einer Hyperflexion und -extension der Wirbelsäule entgegen und dienen der Fixierung der Bandscheiben (Kusumi, 2010).



**Abb. 3:** Median sagittale Darstellung zweier Lendenwirbel und ihrer Bandstrukturen (Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 301, 1918)  
 1: Ligamentum supraspinale, 2: Lamina, 3: Ligamenta flava, 4: Ligamentum interspinale, 5: Processus spinosus, 6: Discus intervertebralis, 7: Corpus vertebrae, 8: Ligamentum longitudinale anterius, 9: Ligamentum longitudinale posterius, 10: Pedikel

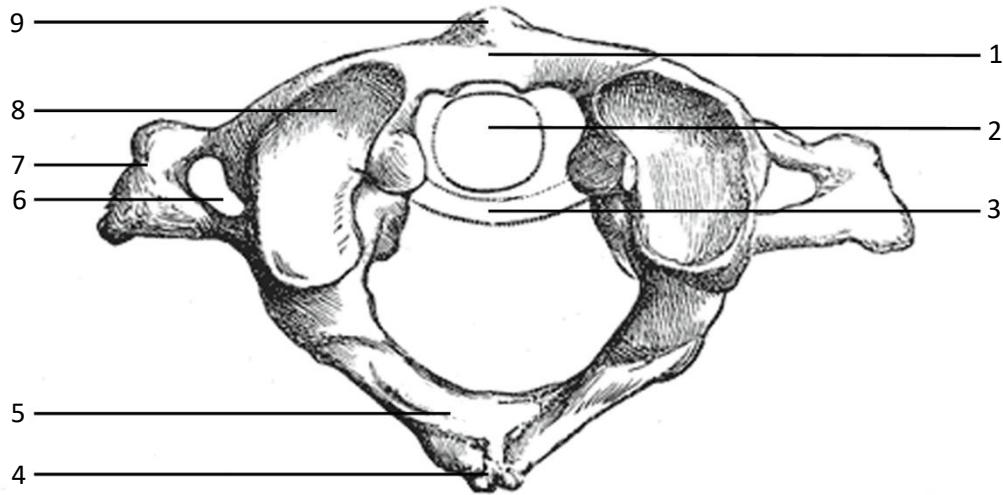
Zusätzlich verbinden die makroskopisch gelben Ligamenta flava die Laminae zweier benachbarter Wirbel, sodass sie die Ventralflexion der Wirbelsäule limitieren (Gillespie et al., 2004). Die interspinalen Wirbelbogenbänder (Ligg. interspinalia) verlaufen zwischen

den Procc. spinosi der Wirbel, das Ligamentum supraspinale schließt sich deren Verlauf dorsal an. Im Bereich der Halswirbelsäule zeigt das Ligamentum supraspinale einen breiteren Verlauf und verbindet die Protuberantia occipitalis externa mit dem siebten Halswirbel (Vertebra prominens). Es wird in diesem Abschnitt als Ligamentum nuchae bezeichnet. Zudem wirken die Ligamenta intertransversaria durch ihren Verlauf zwischen den Processus transversi Seitwärtsbewegungen entgegen.

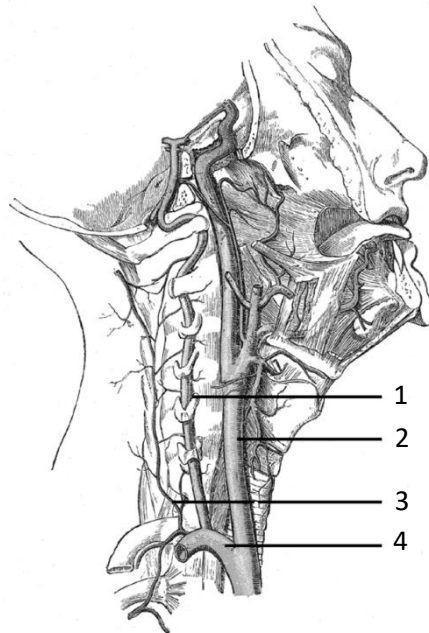
#### 1.1.4 Anatomie der Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule ist in der Lage, die Last des Kopfes aufzunehmen und gleichzeitig die Beweglichkeit von Hals und Kopf zu ermöglichen. Sie besteht aus sieben Wirbeln, wobei die kranialen zwei Wirbel Atlas (C1) und Axis (C2) einen von der oben beschriebenen Grundform der Wirbel abweichenden Aufbau aufweisen.

Der erste Halswirbel (Atlas) besitzt keinen typischen Wirbelkörper, da dieser entwicklungsgeschichtlich mit dem zweiten Wirbelkörper fusioniert ist und als Dens zum zweiten Halswirbel gehört. Es ergibt sich eine Ringstruktur mit seitlichen Massae laterales atlantis, welche der Aufnahme des Gewichtes des Kopfes dienen (Abbildung 4) (Bogduk, 2016). Die Facies articulares superiores der Massae laterales artikulieren mit dem Hinterhauptsbein (Os occipitale) in der Articulatio atlantooccipitalis. Anatomische Besonderheit des Atlas ist der ventrale Arcus anterior atlantis mit dem Tuberculum anterius und der dorsale Arcus posterior atlantis mit dem Tuberculum posterius. Im Processus transversus liegt, wie bei allen Halswirbeln, das Foramen transversarium, durch welches die Arteria vertebralis vom sechsten bis zum ersten Halswirbel nach kranial zieht (Abbildung 5). Dabei wird sie von einem venösen Plexus bzw. der Vena vertebralis und dem Plexus vertebralis, einem Sympathikusgeflecht, begleitet. Der venöse Plexus bzw. die Vena vertebralis verlaufen zudem durch das Foramen transversarium des 7. Halswirbels (Schiebler et al., 1983).



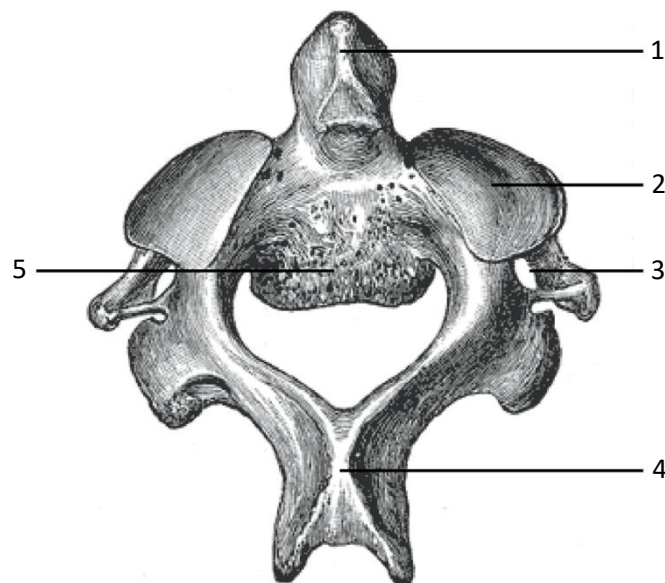
**Abb. 4:** Erster Halswirbel (Atlas) von kranial  
 (Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 86, 1918)  
 1: Arcus anterior atlantis, 2: Einzeichnung des Dens axis, 3: Umriss des Ligamentum transversum atlantis, 4: Tuberculum posterius, 5: Arcus posterior atlantis, 6: Foramen transversarium, 7: Processus transversus, 8: Facies articularis superior, 9: Tuberculum anterius



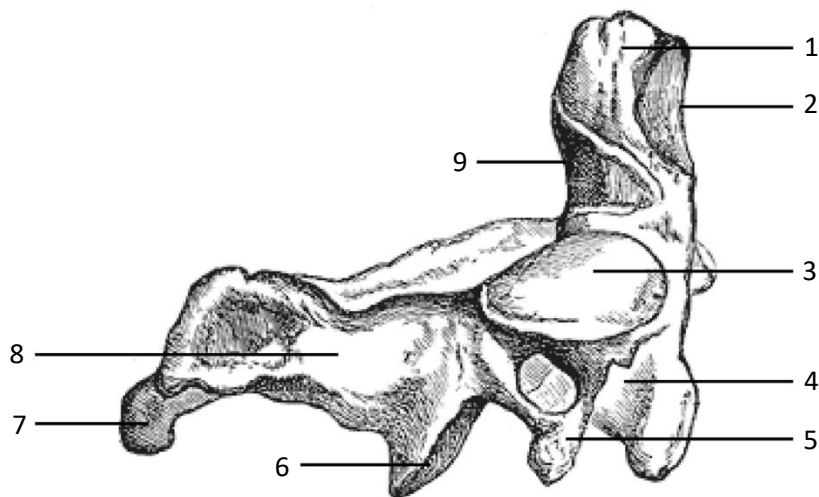
**Abb. 5:** Arteria carotis interna und Vertebralarterien der rechten Halsseite (Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 513, 1918)  
 1: Arteria vertebralis, 2: Arteria carotis communis, 3: Arteria cervicalis profunda, 4: Arteria subclavia

Der zweite Halswirbel (Axis) weist zusätzlich zur Wirbelgrundform einen knöchernen Höcker, den Dens axis (Odontoid process) auf (Abbildungen 6-7). Über die Facies articulares anterior und posterior artikuliert der Dens mit der Fovea dentis des Atlas (Articulatio atlantoaxialis mediana). Über die Facies articulares superiores bestehen weitere Gelenkverbindungen zum Atlas (Artt. atlantoaxiales laterales). Über diese drei Gelenke wird, einem Kugelgelenk ähnlich, eine drei Freiheitsgrade umfassende Beweglichkeit des Kopfes ermöglicht (Mercer et al., 2001). Die Artt. atlantoaxiales und die Artt. atlantooccipitales werden durch weitere Bandstrukturen stabilisiert (Abbildung 8): die Membrana atlantooccipitalis posterior, welche Atlas und Os occipitale verbindet und die Membrana tectoria, eine Fortsetzung des Ligamentum longitudinale posterius. Das Ligamentum cruciforme atlantis setzt sich aus dem Ligamentum transversum atlantis und den Fasciculi longitudinales zusammen. Von den Kondylen des Os occipitale ziehen die Ligamenta alaria zum Dens axis. Von der Densspitze (Apex dentis) verläuft das Ligamentum apicis dentis zum vorderen Teil des Foramen magnum (Sunar et al., 2019).

Normvarianten des Dens sind selten und können als Fraktur fehlinterpretiert werden. Es wurden Fälle beschrieben, in denen der Dens hypoplastisch, nicht angelegt oder mit dem Atlas fusioniert war (Wheeless, 2011).



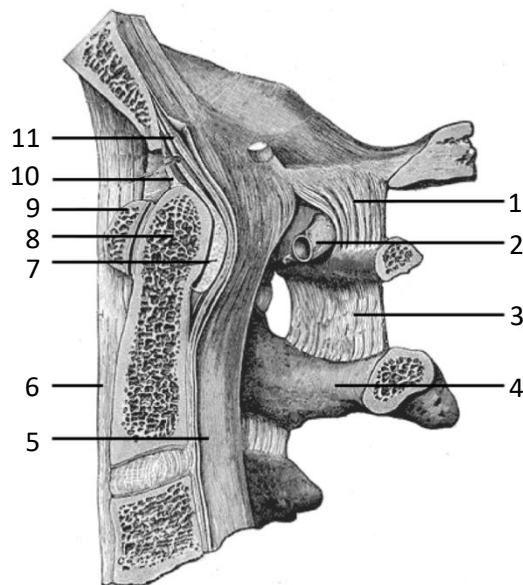
**Abb. 6:** Zweiter Halswirbel (Axis) von kranial  
(Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 87, 1918)  
1: Dens axis, 2: Facies articularis superior, 3: Foramen transversarium,  
4: Processus spinosus, 5: Corpus vertebrae



**Abb. 7:** Zweiter Halswirbel (Axis) von der Seite

(Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 88, 1918)

1: Dens axis, 2: Facies articularis anterior, 3: Facies articularis superior, 4: Corpus axis, 5: Processus transversus, 6: Processus articularis inferior, 7: Processus spinosus, 8: Lamina, 9: Ansatzpunkt des Ligamentum transversum atlantis



**Abb. 8:** Median sagittale Darstellung des Hinterhauptbeines, der ersten drei Halswirbel und ihrer Bandstrukturen

(Quelle: Henry Gray, Anatomy of the Human Body, Fig. 308, 1918)

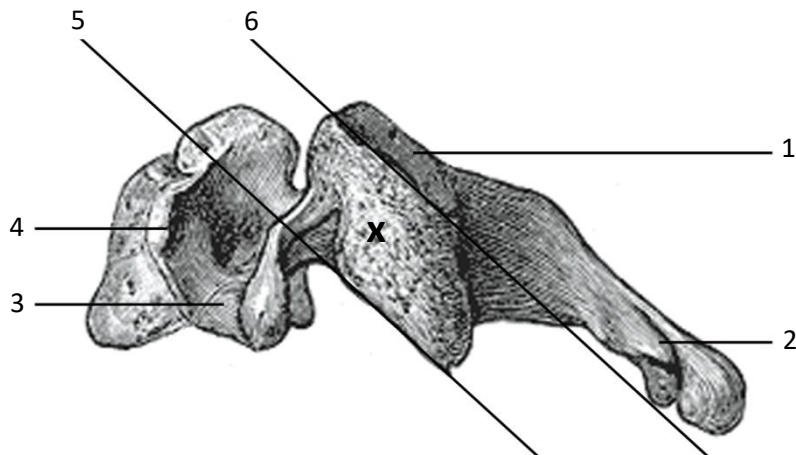
1: Membrana atlantooccipitalis posterior, 2: Arteria vertebralis, 3: Ligamentum atlantoaxialis posterius, 4: Arcus vertebrae, 5: Ligamentum longitudinale posterius, 6: Ligamentum longitudinale anterius, 7: Ligamentum transversum atlantis, 8: Dens axis, 9: Arcus anterior atlantis, 10: Ligamentum apicis dentis, 11: Membrana tectoria

Die Halswirbel drei bis sieben entsprechen dem oben beschriebenen Grundaufbau eines Wirbels (Abbildung 2). Die Wirbelkörper dieses Wirbelsäulenabschnittes sind verhältnismäßig klein, die Foramina vertebrales hingegen groß. Die Wirbelkörperform kann als würfelförmig bis oval beschrieben werden. Seitliche Erhebungen an den Wirbelkörperdeckplatten (Processus uncinati) bilden sich im Laufe des Erwachsenwerdens aus und zeigen eine Funktion als Unkovertebralgelenk (Ebraheim et al., 1997).

Die Querfortsätze der Halswirbel verfügen über das bereits erwähnte Foramen transversarium, durch welches die A. vertebralis ab dem sechsten Halswirbel zum Kopf verläuft. Die Spinalnerven verlassen den durch die einzelnen Foramina vertebralia gebildeten Canalis vertebralis über den Sulcus nervi spinalis im Processus transversus nach lateral. Dabei tritt der Spinalnerv über dem korrespondierenden Wirbelbogen aus (Devereaux, 2007). Der Bereich zwischen den Gelenkflächen der Processus articulares wird als Massa lateralis bezeichnet.

Ein weiteres Merkmal der Halswirbelsäule stellen die um 45° geneigten Gelenkflächen der Massa lateralis dar. Dabei weist die Facies articularis superior eine dorsal-kraniale, die untere Gelenkfläche eine ventro-kaudale Ausrichtung auf (Abbildung 9). Diese Gelenke werden als Wirbelbogengelenke oder Facettengelenke bezeichnet. Die Dornfortsätze von C2 bis C6 sind häufig gegabelt, der stark ausgebildete, meist ungeteilte, Dornfortsatz des Vertebra prominens (C7) ist besonders gut unter der Haut zu tasten.





**Abb. 9:** Halswirbel von der Seite

(Quelle: Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*, Fig. 85, 1918)

1: Facies articularis superior, 2: Processus spinosus, 3: Sulcus nervi spinalis, 4: Processus transversus, 5: Hilfslinie durch die inferiore Gelenkfläche der Massa lateralis (x), 6: Hilfslinie durch die superiore Gelenkfläche der Massa lateralis

#### 1.1.5 Präoperative Bildgebung der Halswirbelsäule

Anhand verschiedener bildgebender Verfahren können Verletzungen und Pathologien an der Halswirbelsäule detektiert und klassifiziert werden, die in Zusammenschau mit dem klinischen Bild eine Einschätzung der Stabilität erlauben (Torretti et al., 2007). Im klinischen Alltag werden häufig folgende Verfahren angewendet: die konventionelle Röntgendiagnostik, die Magnetresonanztomographie (MRT) und die Computertomographie (CT). Die Entscheidung, welches diagnostische Mittel verwendet werden sollte, wird individuell getroffen. Neben konventionellen Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen (anterior-posterior und seitlich) können bestimmte Pathologien beispielsweise durch Dens-Zielaufnahmen, Funktionsaufnahmen oder eine Halswirbelkörper (HWK)-7 Zielaufnahme geklärt werden. Die Magnetresonanztomographie bietet den Vorteil einer besonders guten Darstellung einer möglichen diskoligamentären oder spinalen Beteiligung sowie möglicher Begleitverletzungen der Weichgewebe (Jo et al., 2018). Die Computertomographie ermöglicht eine Darstellung der im konventionellen Röntgenbild schlecht einsehbaren Areale und die dreidimensionale Rekonstruktion der axialen Schnittbilder (Jo et al., 2018). Sanchez et al. konnten 2005 zeigen, dass die Sensitivität, eine HWS-Fraktur im CT zu erkennen, bei 99 % lag. Die Spezifität betrug 100 % und das

Risiko, eine Fraktur anhand der CT-Bilder zu übersehen, konnte mit 0,04 % angegeben werden (Sanchez et al., 2005).

Eine Untersuchung von Antevil et al. kam 2006 zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Sensitivität, eine Fraktur aufzuspüren, lag in ihrer Studie beim konventionellen Röntgen bei 70 %, bei der CT bei 100 % (Antevil et al., 2006). Diese diagnostische Überlegenheit macht die computertomographische Diagnostik besonders für die Untersuchung von (Poly-)Traumapatienten attraktiv. Die weit verbreitete Meinung, dass dieses diagnostische Mittel besonders teuer sei, wurde in einer Studie von Grogan et al. in Bezug auf die Bildgebung der Halswirbelsäule relativiert. Im Kostenvergleich wurde deutlich, dass die Diagnostik mittels HWS-CT bei Traumapatienten, unter Berücksichtigung der im Falle einer übersehenen Verletzung entstehenden Kosten, mit 554 US-Dollar deutlich unter den Kosten der konventionellen Röntgendiagnostik liegen (2142 US-Dollar) (Grogan et al., 2005). Zusätzliche Kosten entstehen beispielsweise durch erneute Diagnostik und Spätfolgen. Bei einer nicht diagnostizierten Halswirbelsäulenverletzung aufgrund einer nicht durchgeführten CT zeigten laut Davis et al. 29 % der Patienten bleibende Spätfolgen (Davis et al., 1993). In der Studie hätte dies in 31 der 34 Fälle durch eine Diagnostik mittels CT vermieden werden können. Auch der zeitliche Aufwand erscheint im Vergleich zu der konventionellen Röntgendiagnostik bei der Diagnostik mittels CT geringer (Antevil et al., 2006). Ein Vorteil der konventionellen Röntgendiagnostik besteht allerdings in einer niedrigeren Strahlenbelastung als bei der CT-Untersuchung (13 mSv bzw. 26 mSv) (Antevil et al., 2006). Insgesamt kamen mehrere Studien zu dem Schluss, dass die Bildgebung mittels CT dem konventionellen Röntgen deutlich überlegen sei und sie als Screeningmethode für HWS-Verletzungen bei Traumapatienten vorgezogen werden sollte (Antevil et al., 2006; Brandt et al., 2004; Grogan et al., 2005). In der vorliegenden Untersuchung werden CT-Bilddatensätze der Halswirbelsäule ausgewertet.

## 1.2 Instabilität der Halswirbelsäule

Verschiedene pathologische Veränderungen können zu einer Instabilität der Halswirbelsäule führen, sodass eine operative Stabilisierung indiziert sein kann. Allgemein bekannt ist, dass eine Instabilität unter anderem traumatisch durch eine

knöchernen Läsion oder Zerreißung des Muskel-Band-Apparates oder durch degenerative Veränderungen entstehen kann. Darüber hinaus gibt es auch verschiedene andere Ursachen, von denen im Folgenden die wichtigsten beschrieben werden.

## 1.2.1 Verletzungen und Instabilität

### 1.2.1.1 Frakturen der Halswirbelsäule

Unterschiedliche Pathomechanismen können eine knöchernen Läsion der Halswirbelsäule herbeiführen: ein Überschreiten struktureller Belastungsgrenzen, beispielsweise im Rahmen direkter Gewalteinwirkung, ein Hochgeschwindigkeits-/ Dezelerationstrauma, aber auch im Rahmen eines vermeintlichen „Bagateltraumas“, zum Beispiel eines missglückten Purzelbaums. Die Möglichkeit einer pathologischen Fraktur muss bei Vorliegen einer Fraktur ohne adäquates Trauma bedacht werden. Frakturen der Halswirbelsäule gehen, bedingt durch die besondere anatomische Lagebeziehung zum Rückenmark, deutlich häufiger mit schwerwiegenden neurologischen Defiziten einher als Frakturen anderer Wirbelsäulenabschnitte (Henne-Bruns, 2008).

Wang et al. bezifferten in einer Studie im Zeitraum von 2001 bis 2010 Unfälle mit motorisierten Fahrzeugen mit 33,1 % als häufigste Ursache einer Fraktur im Bereich der Halswirbelsäule (Wang et al., 2013). In der Arbeit waren Stürze aus großer Höhe mit einer Inzidenz von 32,8 % die zweithäufigste Ursache für HWS-Frakturen. Zudem zeigte sich, dass mittleres Alter (31-45 Jahre) und das männliche Geschlecht Risikofaktoren für das Auftreten eines begleitenden traumatischen Rückenmarksschadens darstellen.

In einer norwegischen Studie wurden Stürze als häufigste Ursache (60 %) der HWS-Frakturen im Zeitraum von 2010 bis 2011 ermittelt (Fredø et al., 2012). Gefolgt wurde dies von Unfällen mit motorisierten Fahrzeugen (21 %) und Fahrrädern (8 %). Tauchen stellte in 4 % der Fälle die Ursache der Fraktur dar. Fredø et al. ermittelten in der schwedischen Population ebenfalls ein höheres Frakturrisiko bei Männern und Personen im Alter von 15 bis 45 Jahren. Zusätzlich fanden sie einen zweiten Altersgipfel bei 65 bis 80 Jahren. Lowery et al. veröffentlichten 2001 ähnliche Ergebnisse (Lowery et al., 2001). Demzufolge hatten Patienten über 65 Jahre ein deutlich erhöhtes Risiko für HWS-Verletzungen (relatives Risiko: 2,09). Das relative Risiko des männlichen Geschlechts betrug in der

Studie 1,72, das der weißen Bürger 1,5. Schwarze Ethnizität (relatives Risiko: 0,55), weibliches Geschlecht (relatives Risiko: 0,58) und das Alter unter 18 Jahren (relatives Risiko: 0,39) stellten sich hinsichtlich HWS-Verletzungen als niedrigere Risiken dar. Die Mortalität der Patienten mit HWS-Fraktur lag laut Fredø et al. nach einem Monat bei 7 %, nach drei Monaten bei 9 % (Fredø et al., 2012).

Aus der Häufigkeit invalidisierender oder letaler Verletzungsfolgen an der Halswirbelsäule ergibt sich die Notwendigkeit einer optimalen traumatologischen Versorgung.

#### 1.2.1.2 Pathologische Frakturen

Osteoporosebedingte Frakturen werden zu den pathologischen Frakturen gezählt. Osteoporose erhöht durch die verminderte Knochendichte und -stabilität das Frakturrisiko (Khosla, 2014). Dabei liegt dem Materialschwund des Knochens ein Missverhältnis zwischen Knochenaufbau und Knochenabbau zugrunde. Die knochenabbauenden Osteoklasten überwiegen gegenüber den knochenaufbauenden Osteoblasten, sodass die Knochendichte reduziert wird. Das weibliche Geschlecht stellt einen Risikofaktor für die Entwicklung der Osteoporose dar. Die primäre Osteoporose bezeichnet die verminderte Knochenmasse im postmenopausalen und senilen Alter. Eine sekundäre Osteoporose liegt vor, wenn beispielsweise mechanische (z.B. Immobilisation), endokrine (z.B. Hyperparathyreoidismus, Morbus Cushing, Hyperthyreose), metabolische (z.B. Diabetes mellitus), onkologische (z.B. Plasmozytom), immunologische (z.B. chronische Polyarthrititis) oder medikamentöse Ursachen (z.B. Glukokortikoide, Cumarine, Tamoxifen, Thyroxin) vorliegen (Lane, 2006). Die demographische Entwicklung, bei der in den letzten Jahren eine Zunahme des Durchschnittsalters festzustellen war, lässt eine steigende Inzidenz und Prävalenz osteoporosebedingter Frakturen erwarten (Lötters et al. 2016; Statistisches Bundesamt, 2017).

Der zu 90 % HLA-B27-assoziierte Morbus Bechterew (Spondylitis ankylosans) manifestiert sich als Erkrankung des rheumatischen Formenkreises unter anderem an den Iliosakral- und Facettengelenken. Die Erkrankung führt zu einem „bambusstabartigen“ Umbau der Wirbelsäule, der eine Entlastung der Wirbelkörper bedingt, sodass sich eine Inaktivitätsosteoporose ausbilden kann. Eine vorliegende Osteoporose bedingt ein

erhöhtes Frakturrisiko (Reinhold et al., 2018). Zudem werden beim Morbus Bechterew nicht selten aufrichtende Operationen der Wirbelsäule in der Spätphase der Erkrankung durchgeführt.

Knochentumore, Metastasen oder eine bakterielle Spondylodiszitis können ebenfalls pathologische Frakturen bedingen (Coleman, 1997). Eine operative Therapie pathologischer Frakturen ist bei neurologischen Ausfällen, Instabilität oder Schmerzzuständen indiziert.

### 1.2.1.3 Einteilung der Frakturen

Da die kranialen Wirbel Atlas und Axis einen spezifischen Aufbau aufweisen, wurden verschiedene Klassifikationen für Frakturen des Atlas, des Axis und des subaxialen Abschnittes der Halswirbelsäule entwickelt.

Klassifikation der Atlasfrakturen nach Gehweiler (Ligamenta, 2019):

Typ I	Isolierte Fraktur des vorderen Atlasbogens
Typ II	Isolierte Fraktur des hinteren Atlasbogens
Typ III	Kombinierte Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens (Jefferson-Fraktur)
Typ IV	Isolierte Fraktur der Massa lateralis
Typ V	Fraktur des Processus transversus

Atlasfrakturen sind meist durch Unfälle mit motorisierten Fahrzeugen oder den Sprung in flaches Wasser bedingt und stellen ca. 10 % der HWS-Frakturen dar (Torretti und Sengupta, 2007).

Klassifikation der Axisfraktur nach Effendi (Ligamenta, 2019):

Typ I	stabile, nicht dislozierte Fraktur, Bandscheibe C2/3 intakt
Typ II	nach ventral dislozierter Wirbelkörper C2 mit Läsion der Bandscheibe C2/3, instabil
Typ III	Typ II-Verletzung mit zusätzlich einseitig verhakter Luxation C2/3, nach ventral flektierter Wirbelkörper, instabil

Eine beidseitige Fraktur des Axisbogens, die mit einer Ruptur der Bandscheibe C2/3 und einer Zerreißung samtlicher Bandstrukturen in dieser Höhe einhergeht, wird als „Hanged man’s fracture“ bezeichnet (Henne-Bruns et al., 2008). Sie entsteht durch ein Hyperextensions-Distraktionstrauma beispielsweise im Rahmen des Erhngens und kann mit einer Durchtrennung des Rückenmarks einhergehen (Henne-Bruns et al., 2008).

Klassifikation der Densfraktur nach Anderson/ D’Alonzo (Ligamenta, 2019):

- Typ I            Fraktur der Densspitze mit Riss der Ligamenta alaria
- Typ II           Fraktur der Densbasis (Frakturlinie an der Verbindungsstelle zwischen Dens und Wirbelkörper, häufigste Form)
- Typ III          Ausriss des Dens im Axiskrper (Frakturlinie im Corpus axis)

Für Frakturen der subaxialen Halswirbelsäule existieren verschiedene Klassifikationen: Allen und Ferguson beschrieben die Frakturen je nach Richtung des Vektors der Krafteinwirkung und somit nach dem Entstehungsmechanismus (Allen et al., 1982). Moore et al. entwickelten eine Klassifikation anhand morphologischer Gesichtspunkte und teilten den Querschnitt der knöchernen Wirbelsäule inklusive Bandapparat in vier Abschnitte ein (Moore et al., 2006). Die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO) stellt die Standardisierung des unfallchirurgisch operativen Vorgehens in den Fokus.

AO-Klassifikation für Verletzungen der unteren Halswirbelsäule (C3-C7) (AOSpine, 2018):

- Typ A            Kompressionsverletzung vorwiegend der vorderen Elemente
  - A0: „nonstructural fractures“: keine oder kleine knöcherne Verletzung, wie isolierte Laminafraktur
  - A1: Impaktionsbrche ohne Hinterkantenbeteiligung
  - A2: Spaltbrche ohne Hinterkantenbeteiligung
  - A3: Berstungsbrche mit Hinterkantenbeteiligung
  - A4: Berstungsbrche mit Beteiligung der Deck- und Bodenplatten
- Typ B            Distraktionsverletzung der hinteren Elemente, Kombination mit Verletzung der vorderen Elemente möglich

	B1: vorwiegend ossäre Verletzung
	B2: vorwiegend ligamentäre Verletzung
	B3: Bandscheibenverletzung durch ventrale Dislokation und Extension
	BL: bilaterale Verletzungen
Typ C	Translationsverletzung der hinteren und vorderen Elemente
	C1: Kombinationsverletzung mit Typ A
	C2: Kombinationsverletzung mit Typ B
	C3: spezielle, nicht klassifizierbare Läsion
Typ F	Verletzung des Facettengelenks
	F1: nicht dislozierte Verletzung
	F2: Fragment >1 cm, > 40 % der Massa lateralis oder disloziert
	F3: freie Massa lateralis
	F4: Subluxation oder Dislokation

### 1.2.2 Diskoligamentäre Verletzungen

Diskoligamentäre Verletzungen stellen den Großteil der HWS-Verletzungen dar (Niethard et al., 2005). Diese umfassen unter anderem Subluxationen oder Luxationen der Facettengelenke mit oder ohne Bandscheibenschaden, die atlantoaxiale Luxation und durch ein Hyperextensions- oder Hyperflexionstrauma bedingte Bandrupturen, die durch Instabilität zu einer Gefährdung des Rückenmarks führen können (Niethard et al., 2005).

Die rotatorische atlantoaxiale Instabilität beispielsweise kann aus einer Verletzung der Ligamenta alaria und des Ligamentum transversum atlantis resultieren (Torretti et al., 2007).

### 1.2.3 Stabilität oder Instabilität von Wirbelsäulenverletzungen

Wirbelsäulenverletzungen werden nach ihrer Stabilität beurteilt: Instabile Wirbelsäulenverletzungen umfassen dabei Verletzungen der Wirbelkörperhinterkante oder Diskuswand sowie Verletzungen, die die Gelenkfortsätze, den Wirbelbogen oder den hinteren Bandkomplex betreffen (Spine Universe, 2020). Zu den stabilen Wirbelsäulenverletzungen zählen leichte Bandscheibenverletzungen, Wirbelkörper-

brüche ohne Hinterkantenbeteiligung und einseitige Wirbelbogen- oder Gelenkfortsatzbrüche.

White und Panjabi haben eine Dislokation/Translokation von mindestens 3,5 mm, eine lokale Kyphose über 11° oder eine Abdeckung der Facettengelenke über 50 % als weitere Zeichen einer HWS-Instabilität definiert (Henne-Bruns et al., 2008).

Traumata im Bereich der Halswirbelsäule bergen durch die enge anatomische Beziehung zu Arteria vertebralis und Rückenmark das Risiko neurovaskulärer Verletzungen (Gupta et al., 2012).

#### 1.2.4 Kongenitale Malformationen

Fusionsfehler während der embryologischen Entwicklung können zu einer Aplasie oder Hypoplasie des Dens axis (Processus odontoideum) führen, was beispielsweise beim Klippel-Feil-Syndrom oder Down-Syndrom vorkommt (Niethard et al., 2005). Alvarez et al. beschrieben, dass bei 10 % der erwachsenen Patienten mit Down-Syndrom eine atlanto-axiale Instabilität mit Rückenmarkskompression vorlag, sodass sie ein Routinescreening auf Instabilität bei allen Patienten mit Down-Syndrom vorschlugen (Alvarez et al., 1986).

Auch Bogenschlussstörungen wie eine Spina bifida oder geringer ausgeprägte Störungen am Wirbelbogen können in Form einer Spondylolyse zu Instabilitäten wie einem Wirbelgleiten (Spondylolisthese) führen (Münzenberg, 1988).

#### 1.2.5 Postoperative Instabilität

Postoperativ kann eine Instabilität der Halswirbelsäule, beispielsweise infolge einer Laminektomie oder einer Entfernung von Facettengelenken, entstehen (Sorrenti et al., 2009).

#### 1.2.6 Neoplasien

Benigne oder maligne primäre Knochentumoren können, genau wie Metastasen extravertebrale Malignome, in Form einer pathologischen Fraktur zu einer Instabilität der



Wirbelsäule führen, sodass eine chirurgische Intervention indiziert ist. Knochenmetastasen entstehen meist durch hämatogene Streuung eines malignen Primärtumors. Beim Erwachsenen sind Mamma-, Prostata-, und Bronchuskarzinome die häufigsten Primärtumoren für eine Skelettmetastasierung (Niethard et al., 2005).

### 1.2.7 Entzündliche Prozesse

Die infektionsbedingte Spondylodiszitis ist eine bakterielle Entzündung der Wirbelkörper und des Bandscheibengewebes. Häufig nachgewiesene Keime sind *Staphylococcus aureus* und *Staphylococcus epidermidis*. Das *Mycobacterium tuberculosis* verursacht eine spezifische, tuberkulöse Spondylitis (Niethard et al., 2005). Als Spondylodiszitis wird das Übergreifen der Entzündung auf eine Bandscheibe bezeichnet. Neben einer antibiotischen Behandlung und einer Defektausräumung kann eine chirurgische Therapie mittels Knochenzementfüllung und/oder Fixateur interne indiziert sein (Herren et al., 2017).

### 1.2.8 Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule

Degenerative Veränderungen stellen die häufigste Ursache für schmerzhaftes Wirbelsäulenerkrankungen dar. Eine Bandscheibendegeneration kann zu einer Gefügestörung und somit zu einer Instabilität führen. Randsklerosierungen der Wirbelkörper und Höhenminderungen der Intervertebralaräume („Bandscheibenverschleiß“) sind Ausdruck einer Osteochondrose. Zudem können sich knöcherne Randzacken der Wirbelkörper, die Spondylophyten, aufgrund einer erhöhten Belastung ausbilden und teils kräftige Abstützungen und Verklammerungen der Nachbarwirbel bewirken (AWMF, 2020).

Eine Spondylarthrose bezeichnet die Arthrose der kleinen Wirbelgelenke (Facettengelenke). Sie kann eine Einengung des Foramen vertebrale oder des Foramen intervertebrale und somit eine myelogene oder radikuläre Kompressionssymptomatik zur Folge haben. Die Foramina intervertebralia sind dabei durch ihren schmalen Querschnitt (Höhe 8 mm, Breite 6-9 mm) besonders prädisponiert. Auch eine Unkovertebralarthrose

kann durch degenerative Vergrößerung der Processus uncinati Schmerzen und eine neurovaskuläre Symptomatik hervorrufen (Abschnitt nach Niethard et al., 2005).

### 1.2.9 Rheumatoide Arthritis

Die Rheumatoide Arthritis ist eine chronisch-entzündliche Autoimmunerkrankung unklarer Genese, die einen sehr variablen, meist schubartigen Verlauf zeigt. Bei Befall der Halswirbelsäule (Zervikalarthritis) kann es zu Versteifungen und/oder Instabilitäten der Intervertebral- und Unkovertebralgelenke kommen. Die krankheitsbedingte entzündliche Destruktion des Bandapparates kann zu einer lebensgefährlichen atlanto-axialen Dislokation führen (Clarke et al., 2006; Herold et al., 2013). Yurube et al. zeigten, dass 43,6 % des Patientenkollektivs mit rheumatoider Arthritis innerhalb von ca. sechs Jahren eine zervikale Instabilität entwickelten (Yurube et al., 2012). Darüber hinaus begünstigt die rheumatisch-entzündliche Erkrankung eine Osteoporose, sodass das Frakturrisiko bei Erkrankten erhöht ist (Niethard et al., 2005).

### 1.3 Therapie mittels Pedikel- und Laminaschrauben

Bei einer Instabilität der Wirbelsäule kann eine operative Therapie indiziert sein. Interventionsindikationen stellen starke Schmerzen sowie drohende oder eingetretene neurologische Defizite dar (Sorrenti et al., 2009). Eine mögliche Therapieform ist eine Osteosynthese (z.B. Lamina- und Pedikelschrauben).

Schon 1891 versteifte Hadra Wirbelsäulenabschnitte mittels Drahtcerclagen (Hadra, 1891). Im Laufe der Zeit wurde dieser Ansatz durch neue Methoden und die Nutzung anderer Materialien erweitert.

Sowohl die Indikationen als auch die therapeutischen Ansätze sind vielfältig, sodass in Abhängigkeit von der Pathologie die optimale Therapieform auszuwählen ist. Dabei ist die Möglichkeit einer Schraubeneinbringung von verschiedenen Parametern, wie z.B. der Lamina- oder Pedikelhöhe, -breite und -länge, abhängig. Die operative Versorgung kann je nach anatomischen Gegebenheiten sowie Art und Ausmaß der Pathologie über einen dorsalen oder einen ventralen Zugangsweg erfolgen. Einige Möglichkeiten der operativen Stabilisierung mithilfe des dorsalen Zugangsweges werden im Folgenden dargestellt.

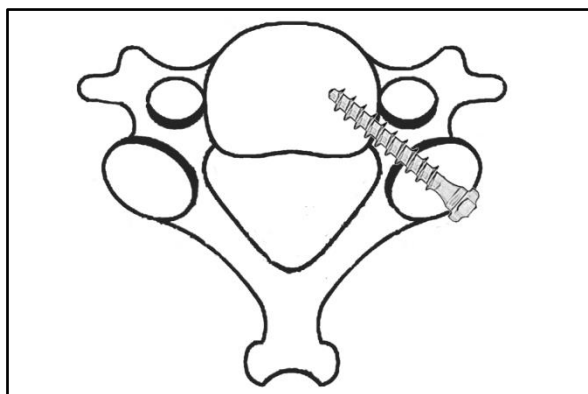
### 1.3.1 Pedikelschrauben

#### 1.3.1.1 Konstruktionsaufbau

Pedikelschrauben dienen der Stabilisierung der Wirbelsäule. Sie ermöglichen eine gute dreidimensionale Fixierung und eine hohe Belastbarkeit (Abumi et al., 2012). Verschiedene Hersteller bieten je nach Bedarf unterschiedliche Modelle in mehreren Größen an, sodass je nach Situation das passende Material gewählt werden kann. Die aus Titan gefertigten Schrauben verfügen meist über ein selbstschneidendes Gewinde, welches das Einbringen in den Pedikel erleichtert (DePuysynthes, 2017). Der Schraubenkopf kann starr (monoaxial) oder über ein Kugelgelenk beweglich (polyaxial) mit dem Schraubengewinde verbunden sein (Ethanium Klinik Heidelberg, 2017). Bei Verwendung mehrerer Schrauben ermöglicht eine Aussparung im Schraubenkopf eine Verbindung mit einem Stabsystem zur Fixierung über mehrere Wirbelsegmente hinweg (Ethanium Klinik Heidelberg, 2017).

#### 1.3.1.2 Operationstechnik

Zum Einbringen der Schraube wird nach Präparation des zu instrumentierenden Wirbelsäulenabschnittes die Kortikalis mithilfe einer Pedikeleröffnungsahle oder eines Bohrers eröffnet. Durch Anwendung eines Tiefenmessgerätes kann anschließend die Länge der zu verwendenden Schraube bestimmt werden. Unter Zuhilfenahme eines Austastinstruments wird die Pedikelwand auf eventuell vorliegende Perforationen überprüft. Anschließend kann die Schraube unter Röntgenkontrolle (zur Lage- und Ausrichtungsverifizierung) eingebracht werden und gegebenenfalls über Stäbe mit anderen Schraubvorrichtungen verbunden werden (Abbildung 10) (Absatz nach DePuysynthes, 2017).



**Abb. 10:** Positionierung einer Pedikelschraube, schematische Darstellung modifiziert nach Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*, Fig. 84, 1918

### 1.3.1.3 Historische Entwicklung der Pedikel-Chirurgie

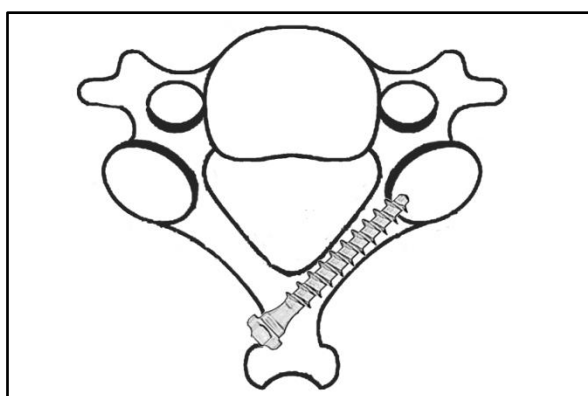
Bereits in den 1970er Jahren beschrieben Roy-Camille et al. Osteosynthesetechniken für Pedikelfrakturen (Roy-Camille et al., 1976). Operationen im Bereich der Halswirbelsäule waren zunächst mit einer langen postoperativen Immobilisierung mittels externen Fixateursystemen oder Zervikalstützen verbunden, wodurch die Lebensqualität für die Patienten stark eingeschränkt wurde. Durch Weiterentwicklung der angewandten Systeme konnte dies optimiert werden. Abumi, der als Vorreiter auf dem Gebiet der HWS-Chirurgie angesehen wird, stellte in den 1990er Jahren eine komplikationsarme Technik für das Einbringen der Pedikelschrauben vor (Abumi et al., 1999). Durch Weiterentwicklung der Operationstechnik und Evaluation der Komplikationen trugen Abumis Erkenntnisse maßgeblich zum Fortschritt in diesem Bereich bei (Abumi et al., 1994). So konnte er 1997 in einer Studie zeigen, dass Pedikelschrauben nicht nur bei Frakturen therapeutischen Nutzen bringen, sondern auch bei nichttraumatischen Läsionen der Halswirbelsäule zur Rekonstruktion eingesetzt werden können (Abumi et al., 1997). Im Jahre 2000 stellten Abumi et al. fest, dass das Verletzungsrisiko neurovaskulärer Strukturen mit klinisch signifikanten Komplikationsfolgen beim Einbringen einer Pedikelschraube relativ gering war, wenn durch präoperative Bildgebung und Kontrolle während der Schraubenplatzierung eine hohe Präzision des operativen Vorgehens sichergestellt wurde (Abumi et al., 2000). So konnte der Einsatz der Pedikelchirurgie deutlich gesteigert werden.

Neue Möglichkeiten der Bildgebung zogen die Entwicklung weiterer chirurgischer Verfahren nach sich. So ließ die Schraubenplatzierung unter Durchleuchtung eine bessere Kontrolle der exakten Positionierung zu. Die dreidimensionale Durchleuchtung stellte sich im Vergleich zur Bildgebung in zwei Ebenen als überlegen dar (Mason et al., 2014). Im Folgenden verbesserte die Computertomographie durch die zunehmende Möglichkeit der dreidimensionalen Bildrekonstruktion deutlich die präoperative Bildgebung und die Kenntnis der anatomischen Verhältnisse, sodass neue, CT-basierte Navigationssysteme entwickelt werden konnten, mit denen sich die Sicherheit während der Schraubeneinbringung weiter erhöhte. Miyamoto und Uno beschrieben 2009 ein System, das eine 3D-Darstellung des operierten Bereiches mittels CT nutzt (Miyamoto und Uno, 2009). Eine Schablone zur Schraubenplatzierung, die auf dreidimensionalen CT-Rekonstruktionen beruht, wurde von Kaneyama et al. als erfolgversprechendes Konzept erprobt (Kaneyama et al., 2014; Kaneyama et al., 2015). Auch die 2012 vorgestellte Technik von Kawaguchi et al., bei der ein „3-dimensional image guide“ genutzt wird, um die Fehlplatzierungsrate der Schrauben zu minimieren, sollte eine weitere Erhöhung der Sicherheit bedingen (Kawaguchi et al., 2012). Die Etablierung der computerassistierten Chirurgie brachte eine Erleichterung des durch die besonderen Anforderungen der HWS-Chirurgie anspruchsvollen Operationsablaufes (Rajasekaran et al., 2010; Ishikawa et al., 2011). Mithilfe verschiedener Bildaufnahmetechniken kann die zu operierende Region abgebildet und anschließend anhand einer Computersoftware dreidimensional rekonstruiert werden, sodass die intraoperative virtuelle Echtzeitdarstellung der Instrumentierung realisiert werden kann. Mit dieser softwaregestützten Chirurgie wurde eine weitere Reduktion des OP-bedingten Verletzungsrisikos neurovaskulärer Strukturen angestrebt. Beispiele für erfolgreiche computernavigierte Chirurgie stellen die CT-basierte und die intraoperative dreidimensionale C-Arm Navigation dar (Liu et al., 2010). Trotz moderner Verfahren können hauptsächlich durch die schlechte Einsehbarkeit und die enge topographische Beziehung zu vulnerablen Strukturen weiterhin schwerwiegende Komplikationen im Rahmen der HWS-Chirurgie auftreten.

### 1.3.2 Laminaschrauben und weitere Systeme

Laminaschrauben stellen je nach Pathologie eine Alternative zur Pedikelchirurgie dar (Du et al., 2017; Bransford et al., 2011). Sie können mit ähnlicher Technik wie die Pedikelschrauben in den Wirbelbogen eingebracht werden, sodass sie zentral in der Laminalängsachse positioniert werden (Abbildung 11).

Auch Massa lateralis-Schrauben, Drähte und Schlingen werden zur Stabilisation der Halswirbelsäule eingesetzt. Hakensysteme können ebenso an verschiedenen Stellen der HWS verwendet werden. Häufig werden sie mit Pedikelschrauben kombiniert, um ein optimales Ergebnis zu erzielen.



**Abb. 11:** Positionierung einer Laminaschraube, schematische Darstellung modifiziert nach Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*, Fig. 84, 1918

### 1.3.3 Komplikationen

Durch die besonderen anatomischen Verhältnisse im Bereich der Halswirbelsäule ergeben sich spezielle Herausforderungen bei operativen Eingriffen in diesem Gebiet. Die räumliche Nähe der knöchernen Wirbel zu vulnerablen neurovaskulären Strukturen bedeutet eine hohe Verletzungsgefahr im Rahmen der instabilitätsverursachenden HWS-Pathologie und der chirurgischen Intervention (Nakashima et al., 2012). Das Myelon (Rückenmark) verläuft zentral durch das Foramen vertebrale. Direkte oder indirekte Rückenmarksverletzungen, wie zum Beispiel die Ausbildung eines intraspinalen Hämatoms, können zu komplexen und bleibenden neurologischen Ausfallserscheinungen führen.

Auch eine radikuläre Symptomatik kann im Bereich der HWS durch einen pathologischen Prozess oder einen operativen Eingriff verursacht werden. Segmentale Spinalnerven verlassen den Wirbelkanal über die Foramina intervertebralia. Einengungen der Neuroforamina zum Beispiel durch Spondylarthrose können allein schon eine radikuläre Symptomatik hervorrufen.

Eine postoperative Schwellung kann kritische Myelon- und Nervenwurzelkompressionen hervorrufen. Eine Schraubenfehlage oder eine Berstung der operierten knöchernen Struktur kann zu einer Verletzung benachbarter Bereiche führen und die Notwendigkeit einer Revision nach sich ziehen. So kann die Arteria vertebralis von einer Kompression betroffen sein oder im Rahmen der chirurgischen Intervention verletzt werden (Burke et al., 2005; Schroeder und Hsu, 2013).

Bei einem operativen Eingriff im Bereich der Halswirbelsäule muss daher die jeweilige enge topographische Beziehung zu umgebenden Strukturen besonders berücksichtigt werden.

Neben akuten postoperativen Komplikationen, zum Beispiel einer Nachblutung, stellen beispielsweise eine bakterielle Infektion, eine (eventuell durch Osteoporose begünstigte) Schraubenlockerung, Materialermüdung und -bruch sowie ein Versagen der Stabilisierungskonstruktion mögliche Gründe für eine operative Revision dar (John et al., 2015; Rihn et al., 2012).

Stabilisierende Eingriffe an der Halswirbelsäule stellen somit äußerst anspruchsvolle Operationen dar, die nur von erfahrenen Chirurgen durchgeführt werden sollten.

#### 1.4 Fragestellung und Zielsetzung

Diese Arbeit dient der Bereitstellung und Auswertung anatomischer Messdaten der Halswirbelsäule zur Nutzung im Rahmen chirurgischer Operationsplanung und -durchführung. Ein standardisiertes Messverfahren ermöglicht die Übertragung auf andere Wirbelsäulenabschnitte und schafft die Voraussetzungen für einen Vergleich der Abschnitte. Es soll untersucht werden, ob ein signifikanter Unterschied der Messwerte im Seitenvergleich sowie im Geschlechtervergleich besteht. Ferner wird ermittelt, wie groß

der prozentuale Anteil in einem Polytrauma-Patientenkollektiv an einer deutschen Universitätsklinik ist, der ausreichende Breiten- und Höhendurchmesser aufweist, um eine Lamina- bzw. Pedikelschraube aufzunehmen. Weiterhin soll untersucht werden, wie häufig ipsilateral Lamina- und/oder Pedikelschrauben eingebracht werden könnten und ob die Höhendurchmesser der betrachteten Struktur zusätzlich zu den Breitendurchmessern einen limitierenden Faktor für die Instrumentierung darstellen. Präoperativ erhobene Faktoren wie Alter, Geschlecht, Spondylarthroseausprägung oder die spezielle anatomische Form der „kontinuierlichen“ C2-Pedikelkortikalis werden darauf untersucht, ob sie als Prädiktoren für die Realisierbarkeit einer Schraubeneinbringung dienen können.



## 2. Material und Methoden

### 2.1 Patientenkollektiv

In der vorliegenden Untersuchung erfolgte eine retrospektive Analyse der computertomographisch gewonnenen Bilddaten der Halswirbelsäule von 161 Patienten. Die Stichprobe umfasste 75 Patienten weiblichen (46,58 %) und 86 Patienten männlichen Geschlechts (53,42 %) in einem Alter von 17 bis 97 Jahren. Die CT-Bilder wurden zufällig aus dem Pool der Polytraumapatienten am Universitätsklinikum Bonn aus den Jahren 2014 bis 2015 ausgewählt. Die Anfertigung der CT-Scans erfolgte aus diagnostischen Gründen, die nicht im Zusammenhang mit dieser Studie standen. Alle in die Studie eingeschlossenen Patienten verfügten über ein ausgewachsenes, reifes Achsenskelett. Bei Hinweisen auf dislozierte Frakturen, Rekonstruktionen, Neoplasien, entzündliche Veränderungen oder Malformationen wurden Patienten oder einzelne Bildbereiche von den Messungen ausgeschlossen. Ebenso wurden Bildbereiche ausgeschlossen, die zum Beispiel wegen Bewegungsartefakten eine schlechte Bildqualität aufwiesen.

### 2.2 Methodischer Hintergrund und Datenerfassung

Die Anfertigung der CT-Bilder erfolgte anhand des Philips Brilliance 64 CT-Scanners und des Philips MX 8000 IDT 16 CT-Scanners. Die axialen CT-Bilder mit einer Schichtdicke von 1 mm wurden mittels der Open-Source-DICOM-Bildbetrachtungssoftware OSIRIX (Version 4.1.2 32-bit) in drei Ebenen rekonstruiert (Sagittalebene, Transversalebene, Frontal-/Koronarebene). Die Dokumentation der anonymisierten Messwerte erfolgte mit Hilfe der Tabellenkalkulations-Software Apache OpenOffice für MacOS (Version 4.0.1 2013). Zusätzlich wurden personenbezogene Angaben bezüglich Alter und Geschlecht der Patienten erfasst. Alle Messungen wurden durch eine auswertende Person durchgeführt und intraindividuell verifiziert.

### 2.3 Statistische Methoden

Die statistische Analyse der Messergebnisse erfolgte mit dem Open-Source-Statistik-Paket in Form der RStudio-Version (0.98.507 2009-2013). Anhand des Kolmogorow-

Smirnow-Tests wurden die erhobenen Daten auf Normalverteilung getestet. Dabei zeigte sich das Vorliegen einer Normalverteilung bei fast allen untersuchten Parametern. Mittels density plots konnte zudem eine weitgehend symmetrische Verteilung beim Großteil der Messwerte festgestellt werden. Da sich einige Parameter als nicht normalverteilt darstellten, wurde zur Feststellung, ob ein signifikanter Seitenunterschied der erhobenen Messdaten vorlag, ein Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben mit anschließender Bonferroni-Korrektur angewendet. Ein p-Wert von  $< 0,03$  vor der Korrektur wurde als statistisch signifikant gewertet. Von 101 getesteten paarigen Parametern stellten sich fünf im Seitenvergleich als signifikant unterschiedlich dar, konnten aber nach näherer Analyse zusammen mit Messparametern ohne signifikanten Seitenunterschied zur besseren Übersicht in einen Datensatz überführt und zusammengefasst analysiert werden. Es wurden Mittelwerte, Standardabweichung ( $1 \sigma$ ), Minimal- und Maximalwert sowie der Median, Standardfehler und die eingeschlossene Patientenzahl der jeweiligen Messung angegeben. Außerdem wurde der prozentuale Anteil platzierbarer Lamina- und Pedikelschrauben unter verschiedenen Voraussetzungen bestimmt.

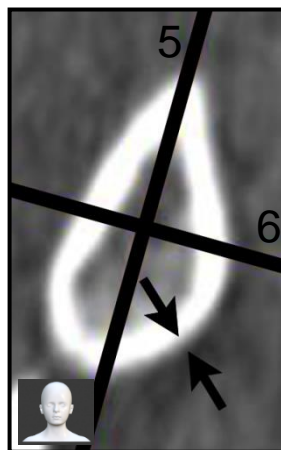
Die festgelegte Messgenauigkeit betrug 0,01 mm bei Distanzmessungen und 1 Grad bei Winkelmessungen. Aus technischen Gründen wurden die angezeigten Dezimalstellen der Winkelgrade zunächst miterfasst. Zur Testung des tatsächlichen Messfehlers wurden in einem CT-Bilddatensatz 100 Kontrollmessungen bei vier Parametern (Breiten- und Höhendurchmesser (äußere Kortikalis) der C3-Lamina links und des C3-Pedikels rechts) durchgeführt. Das Ergebnis zeigte einen Messfehler von 0,0013 mm (C3LB1ka) bis 0,0015 mm (C3PHrka), der weit unterhalb des kritischen Wertes aus der t-Verteilungsanalyse bei einem Signifikanzniveau von 3 % (1,903) lag.

## 2.4 Messtechnik

Um der interindividuellen Variabilität der anatomischen Strukturen der Halswirbelsäule Rechnung zu tragen, wurde die Messmethodik derart festgelegt, dass ein Vorgehen für anatomische Regelfälle konzipiert wurde, welches sich durch definierte Messpunkte und Konstruktionsverfahren auszeichnet. Für seltenere anatomische Varianten oder stark degenerativ veränderte Wirbel wurden die Messlinien optisch adaptiert. Durch anatomische Gegebenheiten (z.B. Skoliose, Lordose, Kyphose) oder

Lagerungsungenauigkeiten kann es zu Differenzen zwischen Wirbelebenen und CT-Ebenen kommen. Daher erfolgte die Festlegung der Messebenen und Messachsen des jeweiligen Wirbels im Bild. Die nachfolgend verwendeten Ebenenbezeichnungen beziehen sich auf den jeweils gemessenen Wirbel.

Die CT-Bilddarstellung erfolgte mit dem Programm OSIRIX für MacOS. Dabei wurde das HWS-CT des jeweiligen Patienten geladen und im 3D Viewer Curved MPR in drei Ebenen rekonstruiert (Sagittalebene, Transversalebene, Frontal-/Koronarebene). Die Graustufen wurden mittels Knochenfenster-Voreinstellung (optimierte Grauwerteinstellung zur computertomographischen Knochendarstellung) festgelegt. Die Messungen erfolgten bilateral. Als Kortikalisgrenze wurde die scharf abgebildete Kontur definiert; der umgebende kontrastärmere Bereich wurde nicht berücksichtigt (Abbildung 12).



**Abb. 12:** Exemplarische Darstellung einer Kortikalisunschärfe in der CT-Bildgebung  
Kortikalisgrenze im frontalen Schnittbild Lamina arcus vertebrae 5  
Pfeile: kontrastärmerer Bereich, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse

Mittels Zoomfunktion wurde der zu messende Bereich optimal dargestellt. Falls nicht anders erwähnt, wurde die Achseinstellung der jeweils vorhergehenden Messung übernommen. Die Einstellungsachsen sind im nachfolgenden Abschnitt konstant beziffert und stehen rechtwinklig zueinander. Die Messungen erfolgten, falls erforderlich, nach erneuter Justierung der vorherigen dreidimensionalen Ebeneneinstellungen.

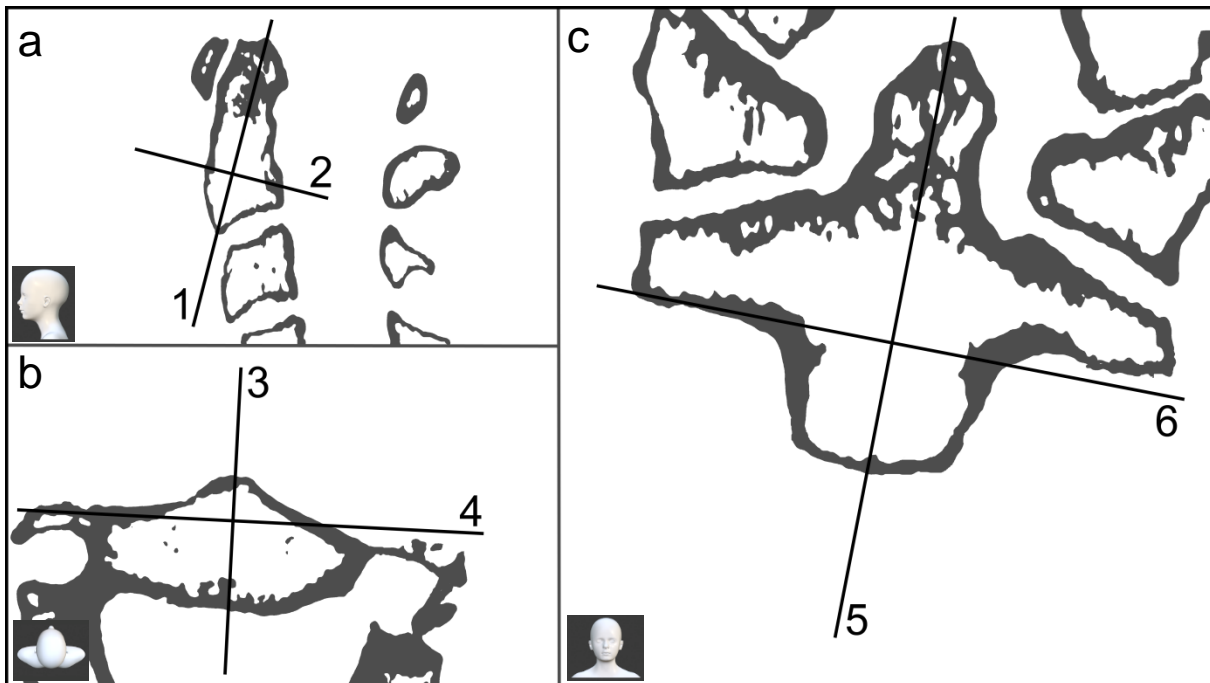
Folgende Festlegungen des Messvorganges wurden getroffen:

### 2.4.1 Messung HWK 2

#### Wirbelkörperhöhe mit Dens:

In der 3D-Darstellung (drei Fenster) wurde das Achsenkreuz (CT-Achsen) im transversalen und sagittalen Schnittbild auf dem zu messenden Wirbelkörper zentriert und mittels Zoomfunktion ein optimaler Bildausschnitt gewählt. Im Falle von HWK 2 erfolgte die Einstellung im sagittalen Schnittbild so, dass primär die Denslängsachse (1) gewählt wurde (Abbildung 13a). Die Denslängsachse wurde als Achse durch den Punkt des Aufeinandertreffens der Wirbelkörperbodenplatte und der ventralen Wirbelkörperfläche entlang der maximalen Ausdehnung zum Apex dentis definiert.

Im zweiten Schritt erfolgte die Zentrierung der longitudinalen Messachse (5) entlang der Denslängsachse in der Frontalebene (Abbildung 13c). Im dritten Schritt wurde die Transversalachse im transversalen Schnittbild rotiert, sodass sie hinterkantenparallel verlief (Abbildung 13b Achse 4).



**Abb. 13:** HWK 2 - Achsenlage im CT-Bild

oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse, unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse, rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse; schematische Darstellung

Im frontalen Schnittbild wurde die Länge zentral entlang der Densachse von der äußeren Kortikalis der Bodenplatte bis zur äußeren Kortikalis des Apex dentis gemessen (Abbildung 14).

#### Wirbelkörperhöhe ohne Dens:

Im frontalen Schnittbild wurde eine Hilfslinie (h) an die äußere Kortikalis im Bereich der maximalen Krümmung des Überganges zwischen Dens und Pedikel angelegt (Abbildung 15). Die Wirbelkörperhöhe wurde im frontalen Schnitt zentral entlang der longitudinalen WK-Achse von der äußeren Kortikalis der WK-Bodenplatte bis zur Hilfslinie gemessen.

In Einzelfällen, in denen der Pedikel in der gewählten Einstellung nicht ausreichend dargestellt war, erfolgte eine Nachjustierung der Längsachse im sagittalen Schnittbild (1) nach dorsal bis die Pedikelgrenzen erkennbar waren. In der so gewählten Frontalebene wurde die Messung durchgeführt.



**Abb. 14:** Messung Wirbelkörperhöhe mit Dens (Pfeil)  
6: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 15:** Messung Wirbelkörperhöhe ohne Dens (Pfeil)  
h: Hilfslinie, a: kranialer Schnittpunkt,  
b: kaudaler Schnittpunkt,  
6: Transversalachse;  
schematische Darstellung

#### Densbreite koronar (Densbasis):

Im frontalen Schnittbild wurde die im vorherigen Schritt ermittelte Hilfslinie (h) dergestalt verschoben, dass sie parallel zur gefundenen Transversalachse (6) ausgerichtet wurde, indem der sich kranialer befindende Schnittpunkt der Hilfslinie mit der äußeren Kortikalis

(a) beibehalten und der sich kaudaler befindende Schnittpunkt (b) an der äußeren Kortikalis nach kranial verlagert wurde (Abbildung 16).

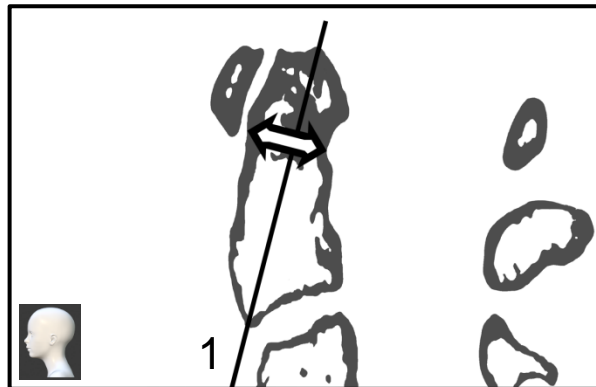
Die Messung der koronaren Densbreite erfolgte einschließlich der äußeren Kortikalis entlang der Hilfslinie.

#### Densbreite sagittal (Tiefe):

Im sagittalen Schnittbild wurde optisch der schmalste sagittale Densdurchmesser senkrecht zur vorher ermittelten Denslängsachse (1) bestimmt (Abbildung 17). Die Messung inkludierte jeweils die äußere Kortikalisgrenze. Der Messbereich begann kaudal des posterioren Tuberkulums der Densspitze im Bereich der konkaven Taillierung des Atlanto-Dental-Gelenkes, sodass die sich verjüngende Densspitze exkludiert war.



**Abb. 16:** Messung Densbreite koronar (Pfeil)  
h: Hilfslinie,  
a: gleichbleibender Schnittpunkt,  
6: Transversalachse; schematische Darstellung



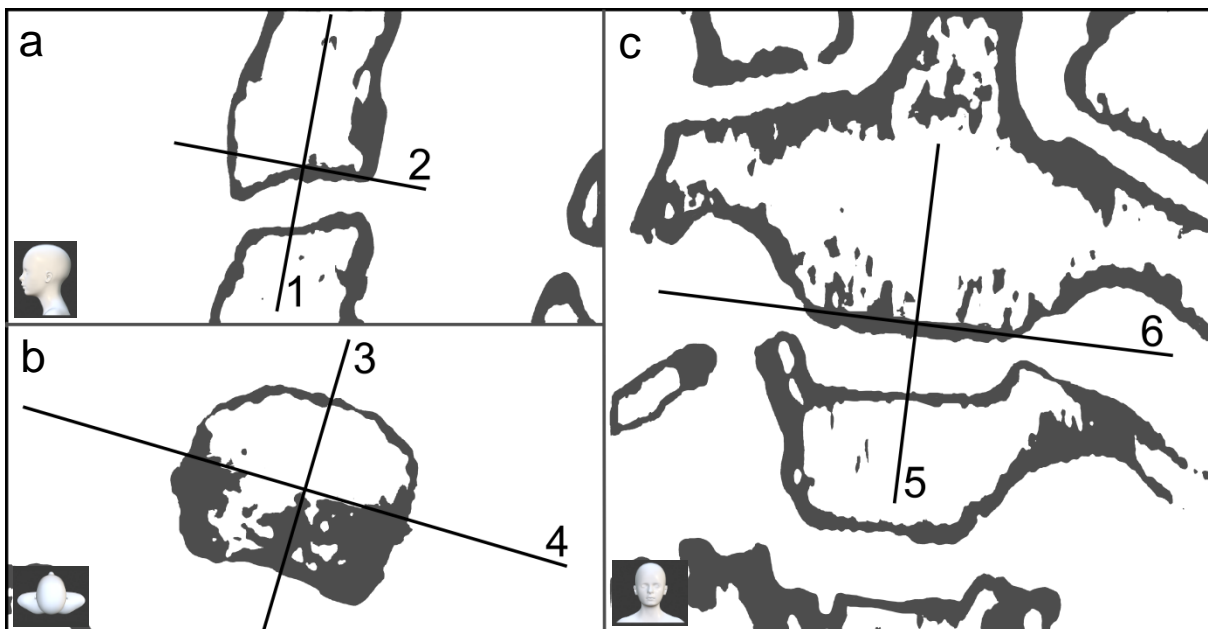
**Abb. 17:** Messung Densbreite sagittal (Pfeil)  
schematische Darstellung

#### Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser):

Im sagittalen Schnittbild wurde die Sagittalachse (2) so rotiert, dass sie sowohl die Wirbelkörpervorderkante als auch die Wirbelkörperhinterkante schnitt und dabei an mindestens einem Punkt zentral zwischen innerer und äußerer Kortikalisgrenze der Bodenplatte verlief (Abbildung 18a).

Die Frontalebene wurde festgelegt, indem die hinterkantenparallele Wirbellängsachse (1) zentral im Wirbelkörper positioniert wurde, sodass sie in der Mitte zwischen den Schnittpunkten der gedrehten Sagittalachse mit der Wirbelkörpervorder- und Hinterkante lag.

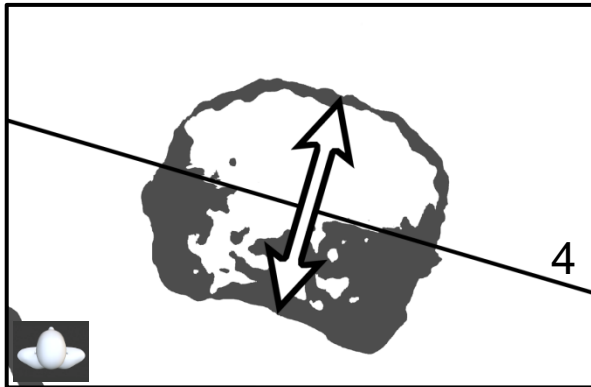
Die Messung der Bodenplattenlänge erfolgte im transversalen Schnittbild anteroposterior unter Einschluss der äußeren Kortikalis von der ventralen Wirbelkörperspitze entlang der Wirbelkörpermittellinie zur Hinterkantenmitte (Abbildung 19).



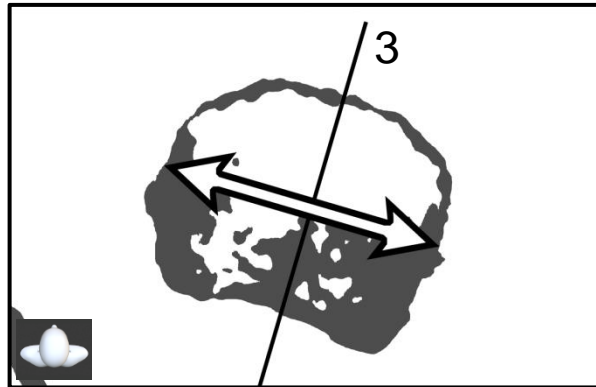
**Abb. 18:** Bodenplatte - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung

#### Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser):

Im transversalen Schnittbild wurde die Messung entlang der hinterkantenparallelen Messachse (4) inklusive der äußeren Kortikalis durchgeführt (Abbildung 20).



**Abb. 19:** Messung Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) (Pfeil)  
4: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 20:** Messung Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) (Pfeil)  
3: Sagittalachse; schematische Darstellung

#### Lamina-Parameter:

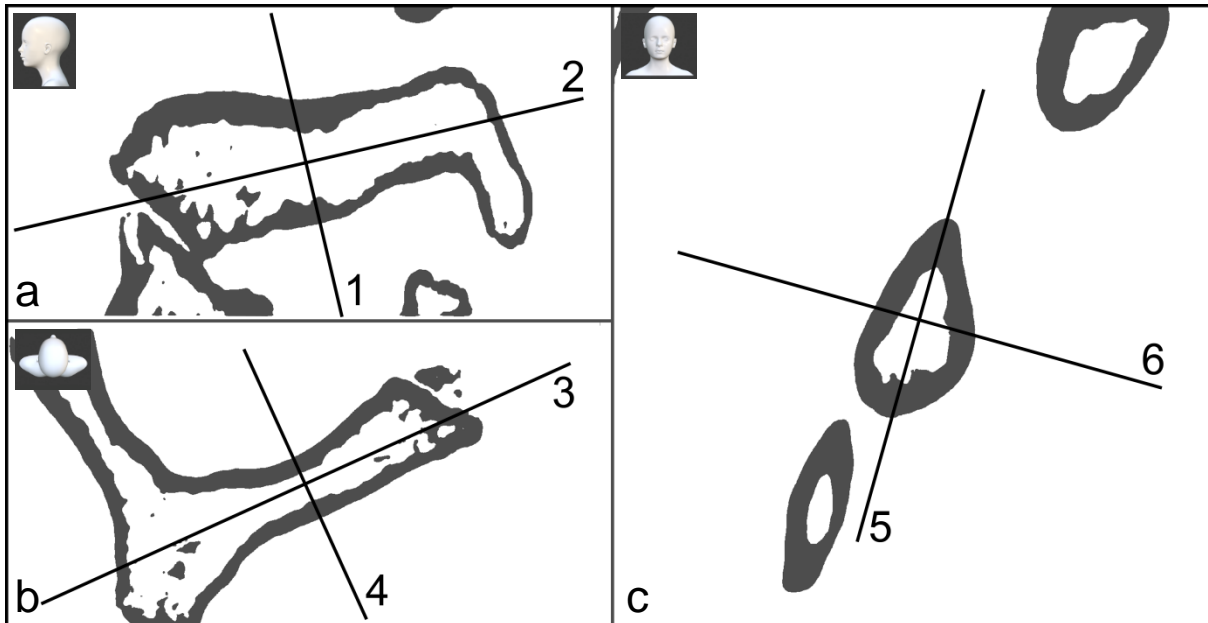
Im transversalen Schnittbild wurde das Achsenkreuz der CT-Achsen zentral in der Lamina platziert (Abbildung 21a). Das rechtwinklige Achsenkreuz wurde im transversalen Schnittbild so gedreht, dass die Sagittalachse der Laminalängsachse (3) entsprach (Abbildung 21b). Die Achse wurde so platziert, dass sie den Verlauf einer Laminaschraube darstellte. Der Eintrittspunkt befand sich am Übergang der kontralateralen Lamina zum Processus spinosus. Der Achsenverlauf war parallel zum Verlauf der Laminaschenkel im Bereich des Laminaisthmus. Der Laminaisthmus wurde in dieser Arbeit definiert als der schmalste Durchmesser in der Transversalebene bezogen auf eine rechtwinklige Messung zur Laminaachse inklusive der äußeren Kortikalisgrenzen.

Im transversalen Schnittbild sollten die rotierte Sagittal- (3) und Transversalachse (4) zentral im Laminaisthmus liegen. In Einzelfällen war diese Ausrichtung der Laminalängsachse durch geschwungene Laminaverläufe nicht möglich. In diesen Fällen wurde zur Simulation eines optimierten Schraubenverlaufes die Achsausrichtung optisch angepasst.

Im folgenden Schritt erfolgte im sagittalen Schnittbild die Rotation der Sagittalachse in die zentrale Laminalängsachse (Abbildung 21a Achse 2).



Analog wurde die Messachse im frontalen Schnittbild (5) entlang der Laminaachse platziert (Abbildung 21c).



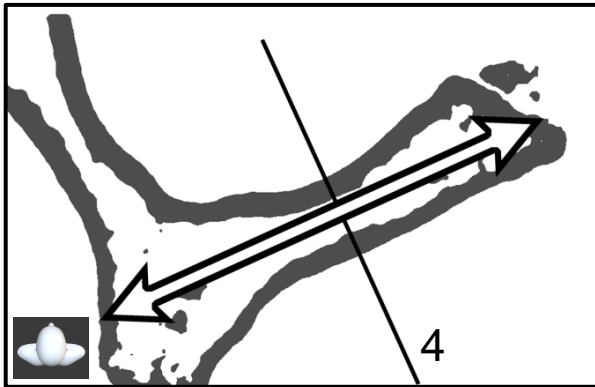
**Abb. 21:** Lamina - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung

#### Laminalänge (äußere Kortikalis):

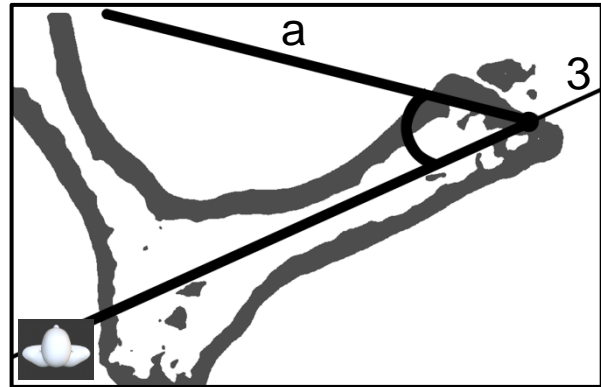
Die Laminalänge wurde im transversalen Schnittbild entlang der Laminalängsachse (Abbildung 21b Achse 3), beginnend an der äußeren Kortikalis des Überganges der kontralateralen Lamina zum Processus spinosus, mittig durch den Isthmus zur äußeren Kortikalis des Austrittspunktes erfasst (Abbildung 22).

#### Laminawinkel:

Es wurde der Winkel erfasst, den die Laminaachse (3) im transversalen Schnitt mit der Wirbelkörperhinterkante bildete (Abbildung 23). Um diesen Winkel zu bestimmen, wurde ein Schenkel der Winkelmessung dorsal beginnend zentral entlang der Laminaachse ausgerichtet, der zweite Schenkel verlief parallel zur Wirbelkörperhinterkante.



**Abb. 22:** Messung Laminallänge (Pfeil)  
4: Transversalachse; schematische Darstellung



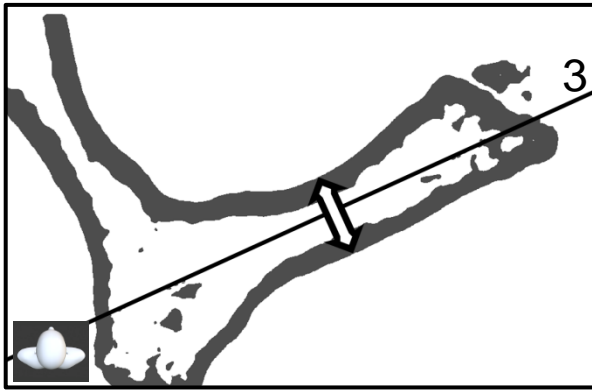
**Abb. 23:** Messung Laminawinkel  
3: Sagittalachse,  
a: Wirbelkörperhinterkanten-parallel  
Schenkel; schematische  
Darstellung

#### Laminabreite (äußere Kortikalis):

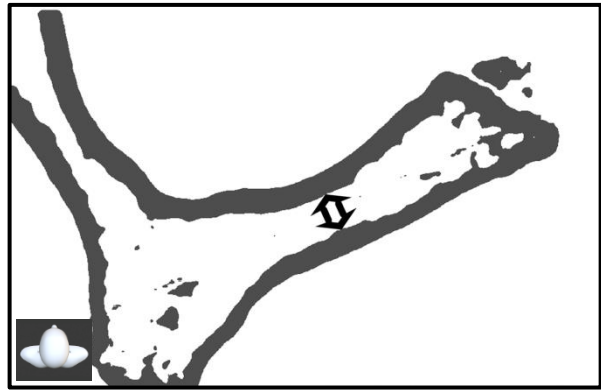
Die Bestimmung der Laminabreite erfolgte im transversalen Schnittbild einschließlich der äußeren Kortikalis am Laminaisthmus rechtwinklig zum Verlauf der Laminaachse (Abbildung 24 Achse 3).

#### Laminabreite (innere Kortikalis):

Im transversalen Schnittbild wurde die Laminabreite am Laminaisthmus rechtwinklig zum Verlauf der Laminaachse (Abbildung 21b Achse 3) zwischen den inneren Kortikalisgrenzen gemessen (Abbildung 25).



**Abb. 24:** Messung Laminabreite (äußere Kortikalis) (Pfeil)  
3: Sagittalachse; schematische Darstellung



**Abb. 25:** Messung Laminabreite (innere Kortikalis) (Pfeil)  
schematische Darstellung

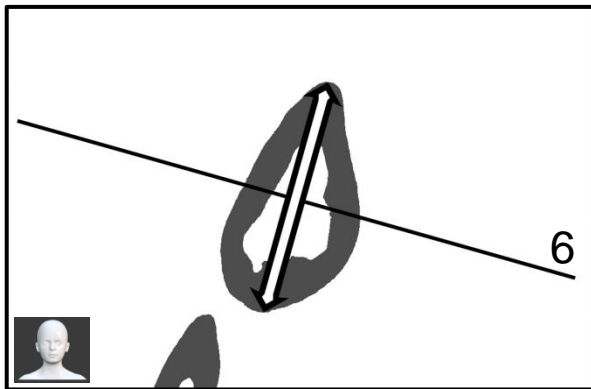
#### Laminahöhe (äußere Kortikalis):

Die Messung der Laminahöhe erfolgte im frontalen Schnittbild am Laminaisthmus. Unter Einschluss der äußeren Kortikalis wurde, der longitudinalen Laminaachse (Abbildung 21c Achse 5) folgend, die Laminahöhe bestimmt (Abbildung 26).

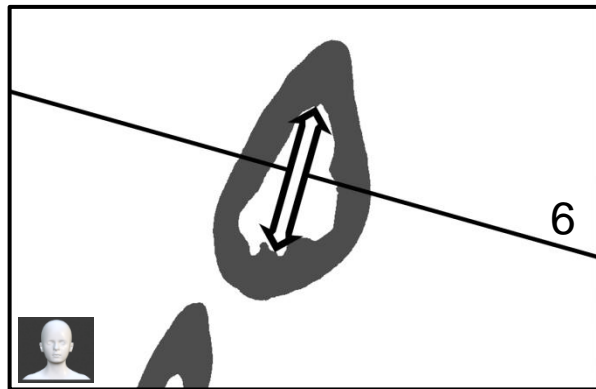
In Einzelfällen entsprach die Laminahöhe nicht der im Schnittbild sichtbaren maximalen Ausdehnung, sondern der Höhe an der Stelle, an der die simulierte Schraube mittig durch die Lamina trat.

#### Laminahöhe (innere Kortikalis):

Analog zur vorhergehenden Messung wurde die Laminahöhe im frontalen Schnittbild am Laminaisthmus erfasst. Der longitudinalen Laminaachse (Abbildung 21c Achse 5) folgend wurde die Höhe zwischen den inneren Kortikalisgrenzen bestimmt (Abbildung 27).



**Abb. 26:** Messung Laminahöhe (äußere Kortikalis) (Pfeil)  
6: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 27:** Messung Laminahöhe (innere Kortikalis) (Pfeil)  
6: Transversalachse; schematische Darstellung

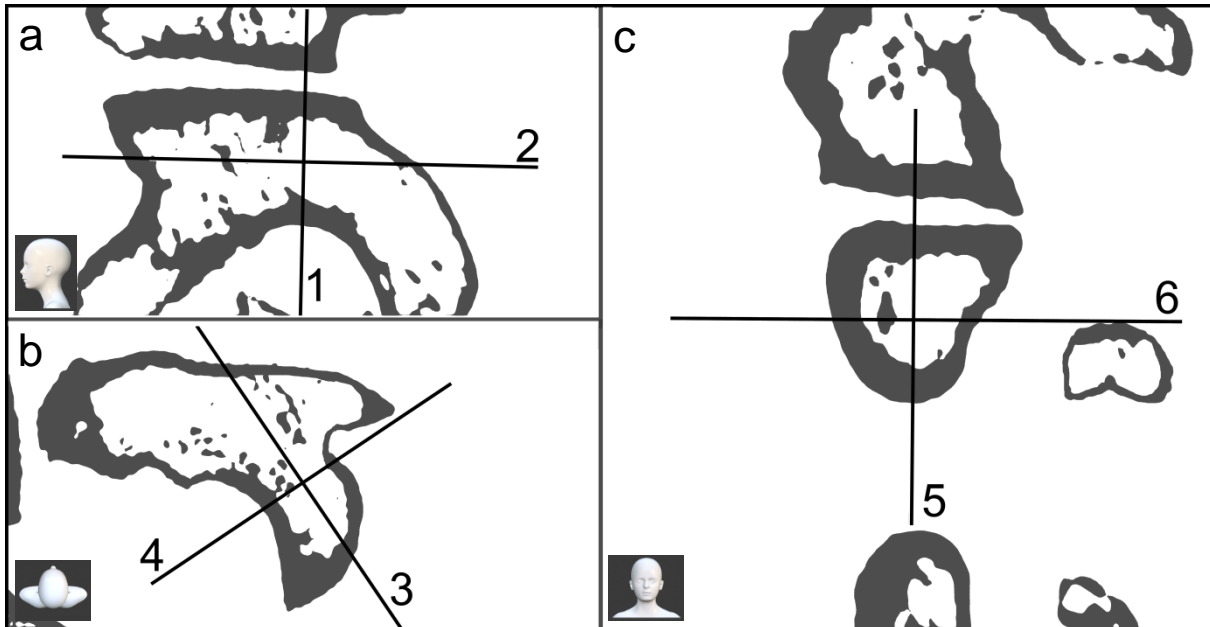
#### Pedikel-Parameter:

Im transversalen Schnittbild erfolgte eine Zentrierung des Achsenkreuzes (CT-Achsen) mittig im zu messenden Pedikel. Anschließend wurde die Sagittalachse im transversalen Schnittbild (3) in die Pedikelachse gedreht (Abbildung 28b). Dabei wurde sie so platziert, dass sie den Verlauf einer Pedikelschraube darstellte. Der Eintrittspunkt befand sich meist mittig dorsal im Bereich der Massa lateralis. Der Achsenverlauf war parallel zum Verlauf der Pedikelschenkel im Bereich des Pedikelisthmus. Der Pedikelisthmus wurde in dieser Arbeit als der schmalste Durchmesser in der Transversalebene, bezogen auf eine rechtwinklige Messung zur Pedikelachse, inklusive der äußeren Kortikalisgrenzen definiert. Im transversalen Schnittbild wurden die gedrehte Sagittal- (3) und Transversalachse (4) zentral im Pedikelisthmus platziert.

Der Austrittspunkt der virtuellen Schraube lag in den meisten Fällen im Bereich der ventralen Wirbelkörperfläche. In Einzelfällen war diese Ausrichtung durch abweichende anatomische Verhältnisse nicht möglich. In diesen Fällen wurde zur Simulation eines optimierten Schraubenverlaufes die Achsausrichtung optisch angepasst. In Einzelfällen, in denen der Pedikelisthmus in der gewählten Einstellung nicht ausreichend dargestellt war, konnte dieser durch Betrachtung kaudaler Transversalebene desselben Pedikels ermittelt werden.

Im sagittalen Schnittbild wurde anschließend das rechtwinklige Achsenkreuz rotiert, sodass die Sagittalachse (2) der Pedikelachse entsprach (Abbildung 28a).

Im frontalen Schnittbild wurde die Longitudinalachse (5) in die longitudinale Pedikelachse gedreht (Abbildung 28c).



**Abb. 28:** Pedikel - Achsenlage im CT-Bild

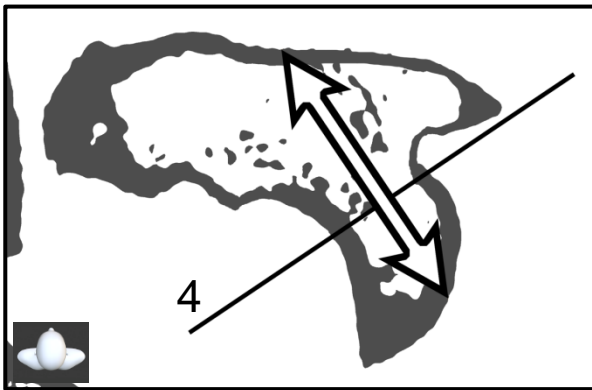
oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung

#### Pedikellänge (äußere Kortikalis):

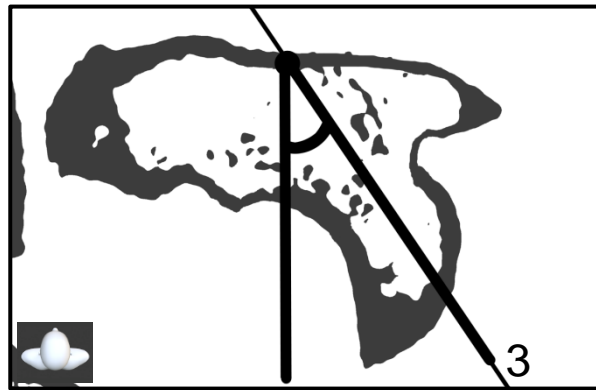
Die Pedikellänge wurde im transversalen Schnittbild entlang der gedrehten Sagittalachse (Abbildung 28b Achse 3) von der äußeren Kortikalis des dorsalen Eintrittspunktes mittig entlang der Pedikelachse zur äußeren Kortikalis des ventralen Austrittspunktes erfasst (Abbildung 29).

### Pedikelwinkel:

Es wurde der Winkel gemessen, der im transversalen Schnittbild durch die zentrale Pedikelachse (3) und die zentrale sagittale Verbindungslinie zwischen ventraler Wirbelkörperspitze und Mitte der Wirbelkörperhinterkante (sagittale Wirbelkörpermittellinie) gebildet wurde (Abbildung 30). Als Orientierungspunkt für die Mitte der Wirbelkörperhinterkante diente bei normalen anatomischen Verhältnissen die Mitte der Dornfortsatzbasis.



**Abb. 29:** Messung Pedikellänge (Pfeil)  
4: Transversalachse; schematische Darstellung



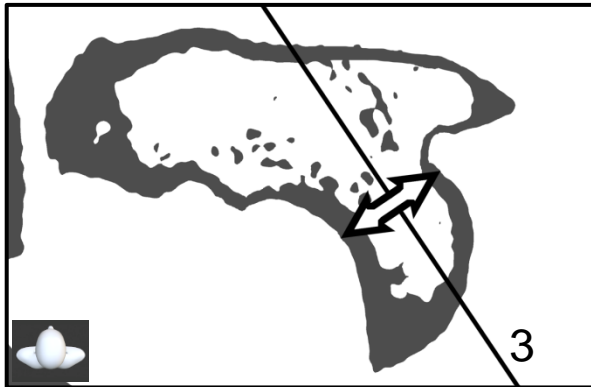
**Abb. 30:** Messung Pedikelwinkel  
schematische Darstellung

### Pedikelbreite (äußere Kortikalis):

Die Messung der Pedikelbreite erfolgte im transversalen Schnittbild am Pedikelisthmus rechtwinklig zum Verlauf der Pedikelachse (3) inklusive der äußeren Kortikalisgrenzen (Abbildung 31). Dabei wurde bei Vorliegen zweier Foramina transversaria auf einer Seite der sich ergebende schmalere Isthmus berücksichtigt.

### Pedikelbreite (innere Kortikalis):

Im transversalen Schnittbild wurde die Pedikelbreite zwischen den inneren Kortikalisgrenzen des Pedikelisthmus rechtwinklig zum Verlauf der Pedikelachse (3) erfasst (Abbildung 32).



**Abb. 31:** Messung Pedikelbreite (äußere Kortikalis) (Pfeil)  
3: Sagittalachse; schematische Darstellung



**Abb. 32:** Messung Pedikelbreite (innere Kortikalis) (Pfeil)  
schematische Darstellung

#### Pedikelhöhe (äußere Kortikalis):

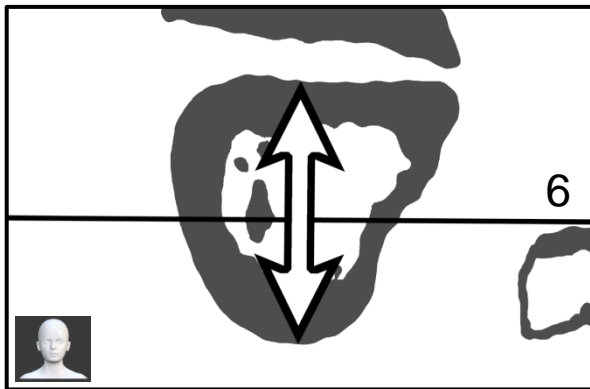
Die Pedikelhöhe wurde im frontalen Schnittbild an der Stelle der zuvor bestimmten geringsten äußeren Pedikelbreite, dem Pedikelisthmus, erfasst (Abbildung 33).

Der longitudinalen Pedikelachse (5) folgend wurde einschließlich der äußeren Kortikalisgrenze die Pedikelhöhe bestimmt.

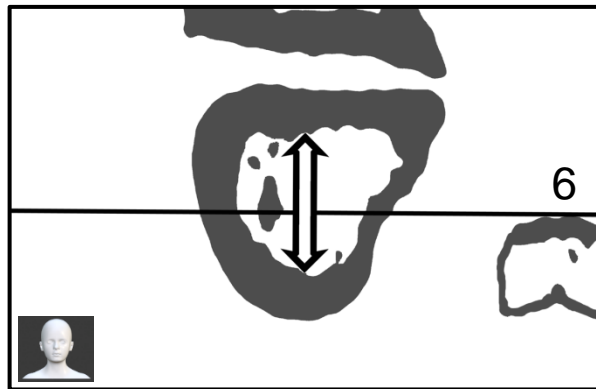
Diese Messung bildete in Einzelfällen nicht die im Schnittbild erkennbare maximale longitudinale Ausdehnung des Pedikels ab, sondern entsprach der Pedikelhöhe an der Stelle, an dem die simulierte Schraube mittig durch den Pedikel verlief.

#### Pedikelhöhe (innere Kortikalis):

Die Pedikelhöhe wurde am Pedikelisthmus im frontalen Schnittbild erfasst. Es wurde, analog zur vorhergehenden Messung, der longitudinalen Pedikelachse (5) folgend die Pedikelhöhe zwischen den inneren Kortikalisgrenzen bestimmt (Abbildung 34).



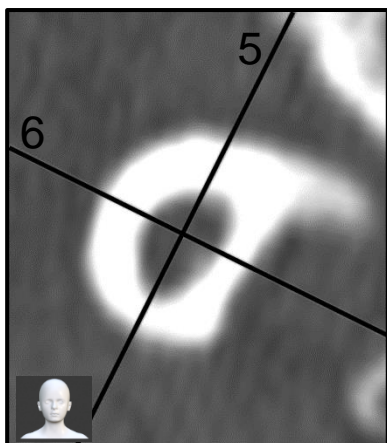
**Abb. 33:** Messung Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) (Pfeil)  
6: Transversalachse; schematische Darstellung



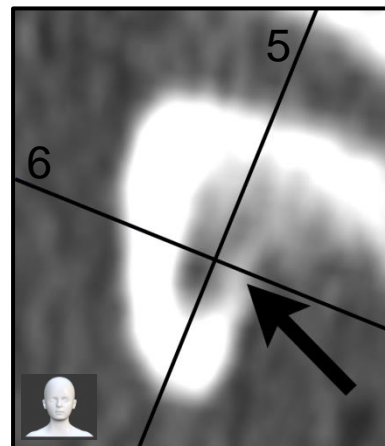
**Abb. 34:** Messung Pedikelhöhe (innere Kortikalis) (Pfeil)  
6: Transversalachse; schematische Darstellung

#### Klassifizierung C2-Pedikelkortikalis:

Der Pedikelkortikalisquerschnitt wurde optisch einer der beiden Kategorien „kontinuierlich“ (1) oder „diskontinuierlich“ (0) zugeordnet. Ausschlaggebend für die Einteilung war die Beurteilung der Kortikalis auf Höhe des Pedikelisthmus im frontalen Schnittbild. Eine sichtbare Unterbrechung oder deutliche Kontrastminderung der abgebildeten Kortikalis hatte eine Einstufung in die Kategorie „diskontinuierlich“ zur Folge (Abbildung 36). Bei einer den Querschnitt umrandenden Kortikalis wurde diese als „kontinuierlich“ klassifiziert (Abbildung 35).



**Abb. 35:** „kontinuierlicher“ C2-Pedikelkortikalisquerschnitt  
5: Longitudinalachse,  
6: Transversalachse;  
frontales Schnittbild



**Abb. 36:** „diskontinuierlicher“ C2-Pedikelkortikalisquerschnitt  
Pfeil: Kontrastminderung der Kortikalisdarstellung;  
5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse; frontales Schnittbild



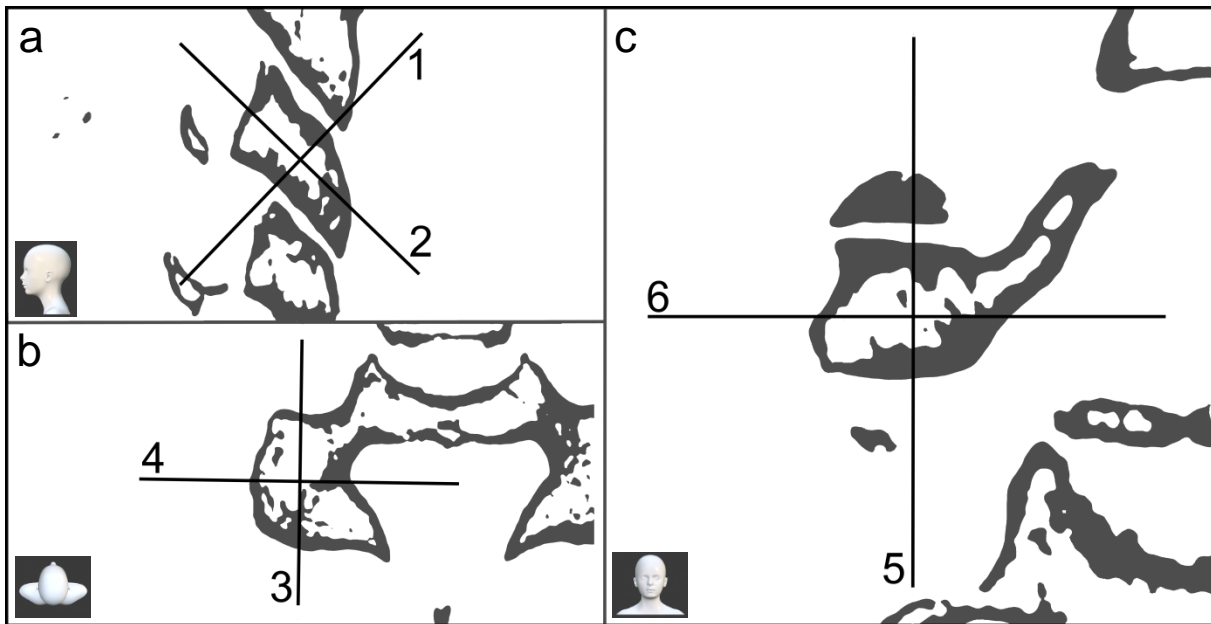
### Massa lateralis Parameter:

Das Achsenkreuz der CT-Achsen wurde im transversalen und sagittalen Schnittbild auf die darzustellende Massa lateralis zentriert. Die Transversalachse (4) wurde so gedreht, dass sie im transversalen Schnittbild einen parallelen Verlauf zur Wirbelkörperhinterkante aufwies (Abbildung 37b).

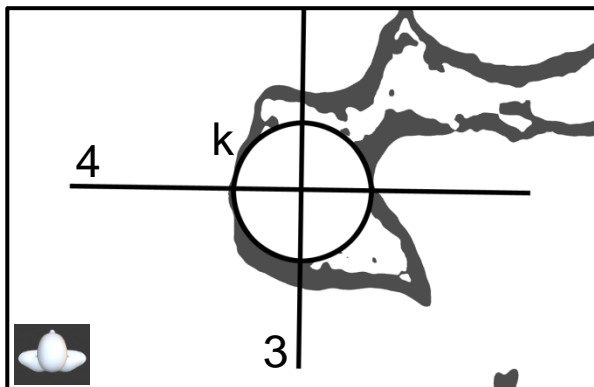
Im nächsten Schritt erfolgte im sagittalen Schnittbild die Rotation der Sagittalachse (2) derart, dass sie annäherungsweise der Achse der Massa lateralis entsprach (Abbildung 37a). Diese Massa lateralis-Achse wurde als die Mittelung der Ober- und Unterkantenschräge definiert.

Im frontalen Schnittbild wurde die Transversalachse (6) parallel zur Unterkante der Massa lateralis rotiert (Abbildung 37c). Ein frontales Schnittbild auf Höhe der Massa lateralis-Unterkante diente der Ermittlung des Unterkantenverlaufes. Diese unterkantenparallele Drehung der Transversalachse (6) wurde bei Veränderung der Schnittebene beibehalten.

Daraufhin wurde im transversalen Schnittbild ein Hilfskreis zentral innerhalb der Massa lateralis gezeichnet, sodass die maximale Kreisausdehnung innerhalb der äußeren Kortikalisgrenze aufgezeigt wurde (Abbildung 38). Der Hilfskreis wurde dabei möglichst zentral innerhalb der Massa lateralis platziert, osteophytische Anbauten wurden bei der Berechnung des Mittelpunktes ggf. nicht berücksichtigt. Die Kreisfläche wurde erfasst. Das in der Transversalebene dargestellte Achsenkreuz wurde auf den Kreismittelpunkt zentriert. Im Regelfall wurde anschließend die Ausrichtung der rotierten Sagittalachse im sagittalen Schnittbild (2) korrigiert, sodass sie bezogen auf die Höhe der Massa lateralis an der Position der longitudinalen Messachse (1) mittig in der Massa lateralis platziert war.



**Abb. 37:** Massa lateralis - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung



**Abb. 38:** Kreisfläche Massa lateralis (k)  
 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 schematische Darstellung

#### Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser):

Die Messung des sagittalen Durchmessers der Massa lateralis erfolgte im transversalen Schnittbild einschließlich der äußeren Kortikalisgrenzen entlang der vorher gefundenen sagittalen Achse (Abbildung 37b Achse 3 und Abbildung 39).

Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser):

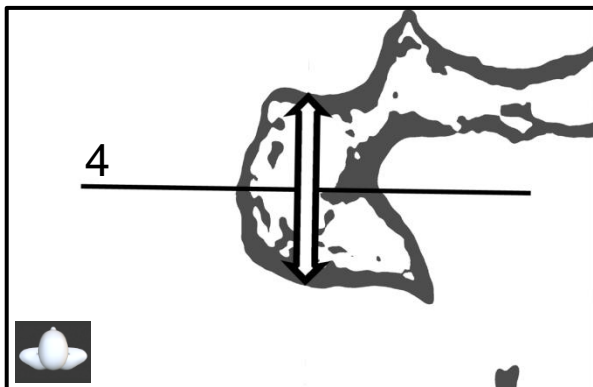
Der transversale Massa lateralis Durchmesser wurde inklusive der äußeren Kortikalisgrenzen im transversalen Schnittbild entlang der zuvor bestimmten gedrehten transversalen Achse (4) erfasst (Abbildung 40).

Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser):

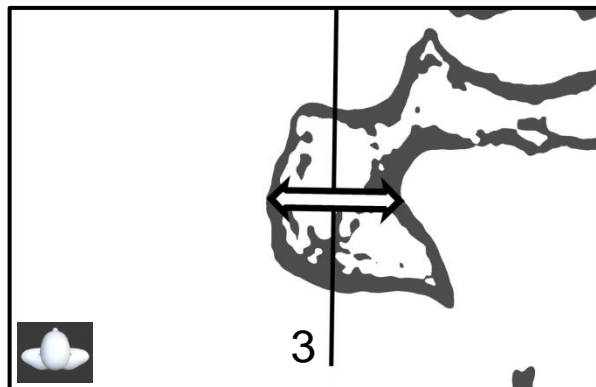
Der schräge Längsdurchmesser der Massa lateralis wurde bestimmt, indem die Strecke von der äußeren Kortikalis des Überganges der Lamina zur Massa lateralis (sichtbare Änderung des Kortikalisverlaufes) durch den Kreismittelpunkt bis zur gegenüberliegenden äußeren Kortikalisgrenze gemessen wurde (Abbildung 41).

Massa lateralis Höhe:

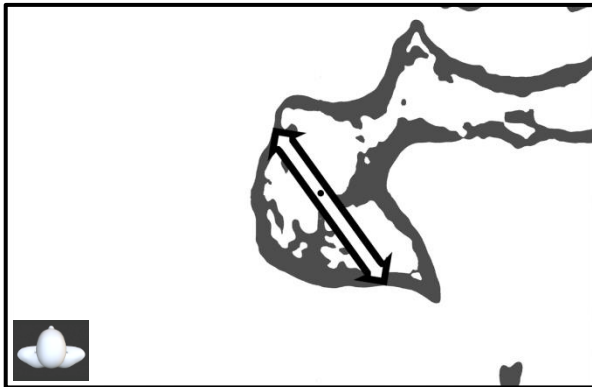
Im sagittalen Schnittbild wurde die Höhe der Massa lateralis entlang der rotierten Longitudinalachse (1) zwischen den äußeren Kortikalisgrenzen gemessen (Abbildung 42).



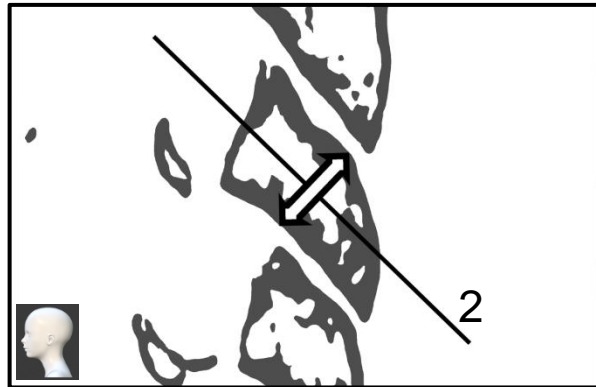
**Abb. 39:** Messung Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser) (Pfeil)  
4: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 40:** Messung Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) (Pfeil)  
3: Sagittalachse; schematische Darstellung



**Abb. 41:** Messung Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) (Pfeil) schematische Darstellung



**Abb. 42:** Messung Massa lateralis Höhe (Pfeil) 2: Sagittalachse; schematische Darstellung

#### 2.4.2 Messung HWK 3-7

Die Messungen der HWK 3 bis 7 verliefen analog zu den Messungen des HWK 2. Folgende Parameter wurden mithilfe einer gesonderten Messtechnik bestimmt:

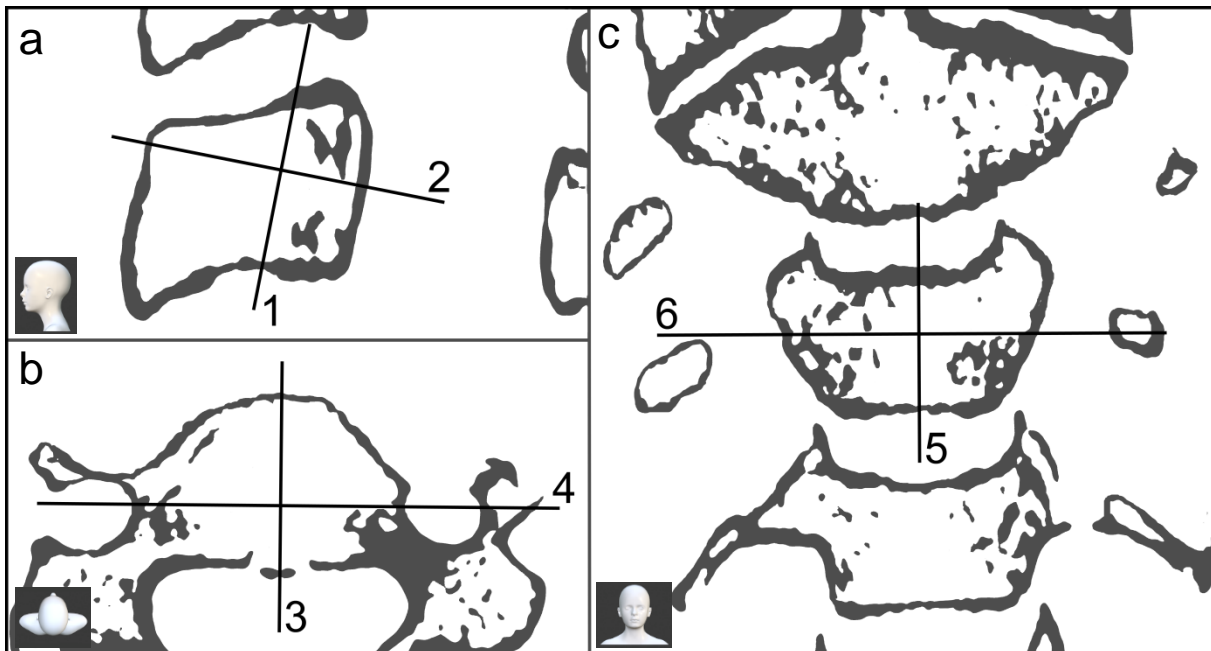
##### Wirbelkörper Parameter:

Das Achsenkreuz (CT-Achsen) wurde im sagittalen und transversalen Schnittbild auf den zu messenden Wirbelkörper zentriert.

Es wurden die Longitudinalachse im sagittalen Schnittbild (Abbildung 43a Achse 1) sowie die Transversalachse im transversalen Schnittbild (Abbildung 43b Achse 4) derart gedreht, dass sie einen parallelen Verlauf zur Wirbelkörperhinterkante aufwiesen.

Im folgenden Schritt wurde die Sagittalachse im transversalen Schnittbild (3) so verschoben, dass sie einen Verlauf durch die Wirbelkörperspitze und die zentrale Wirbelkörperhinterkante aufwies. Bei symmetrischen anatomischen Verhältnissen verlief diese Achse ebenfalls durch die Mitte der Dornfortsatzbasis.

Im frontalen Schnittbild erfolgte die Zentrierung der longitudinalen Messachse (5) entlang der Wirbelkörperlängsachse (Abbildung 43c).



**Abb. 43:** HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung

#### Wirbelkörperhöhe ventral:

Die ventrale Wirbelkörperhöhe wurde im sagittalen Schnittbild bestimmt, indem eine vorderkantenparallele Messung vom höchsten Punkt des Radius der Deckplattenwölbung ventral zur Bodenplatte durchgeführt wurde (Abbildung 44). Die Messung erfolgte einschließlich der äußeren Kortikalis. Lag der höchste Punkt der Deckplattenwölbung über ein Drittel der Wirbelkörperlänge dorsal der ventralen Wirbelkörperfläche, wurde der Punkt des Zusammentreffens von Wirbelkörperdeckplatte und Wirbelkörpervorderfläche als Startpunkt der Messung definiert. Diese Grenze wurde im praktischen Messablauf in einer Größenordnung von 6,00 mm gefunden.

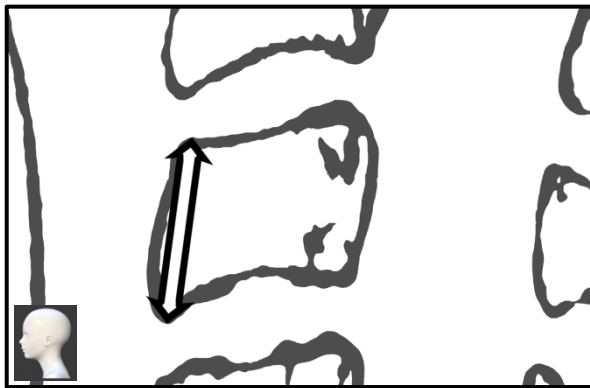
#### Wirbelkörperhöhe zentral:

Zur Bestimmung der zentralen Wirbelkörperhöhe wurden im sagittalen Schnittbild zwei diagonale Hilfslinien (d1, d2) zwischen den Wirbelkörperecken (Schnittpunkte der

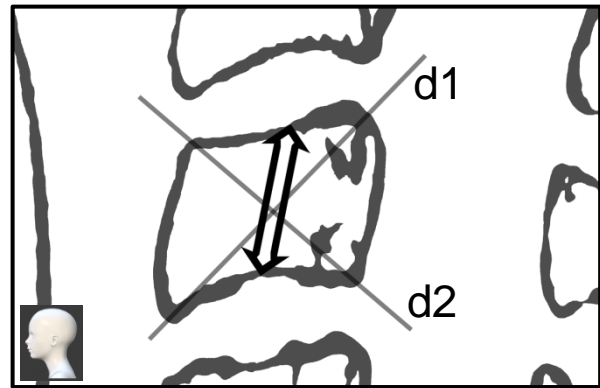
Vorderfläche/Deckplatte/Bodenplatte/Hinterkante) eingezogen, sodass ein zentral im Wirbelkörper liegender Schnittpunkt gebildet wurde (Abbildung 45). Durch diesen Schnittpunkt wurde hinterkantenparallel die mittlere Wirbelkörperhöhe von der äußeren Kortikalis der Deckplatte bis zur äußeren Kortikalis der Bodenplatte gemessen.

#### Wirbelkörperhöhe dorsal:

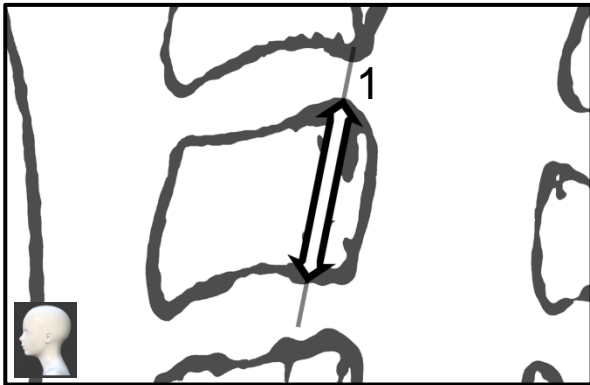
Die dorsale Wirbelkörperhöhe wurde als hinterkantenparallele Messung vom höchsten Punkt des Radius der dorsalen Deckplattenwölbung zur Bodenplatte festgelegt (Abbildung 46). Die Messung inkludierte die äußere Kortikalis. Lag der höchste Punkt der Deckplattenwölbung über ein Drittel der Wirbelkörperlänge ventral der dorsalen Wirbelkörperfläche, wurde der Punkt des Zusammentreffens von Wirbelkörperdeckplatte und Wirbelkörperhinterkante als Beginn der Messung definiert. Diese Grenze wurde im praktischen Messablauf bei einem Abstand von ca. 6,00 mm gefunden.



**Abb. 44:** Messung Wirbelkörperhöhe ventral (Pfeil)  
schematische Darstellung



**Abb. 45:** Messung Wirbelkörperhöhe zentral (Pfeil)  
d1, d2: Hilfslinien; schematische Darstellung



**Abb. 46:** Messung Wirbelkörperhöhe dorsal (Pfeil)  
1: Longitudinalachse; schematische Darstellung

#### Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser):

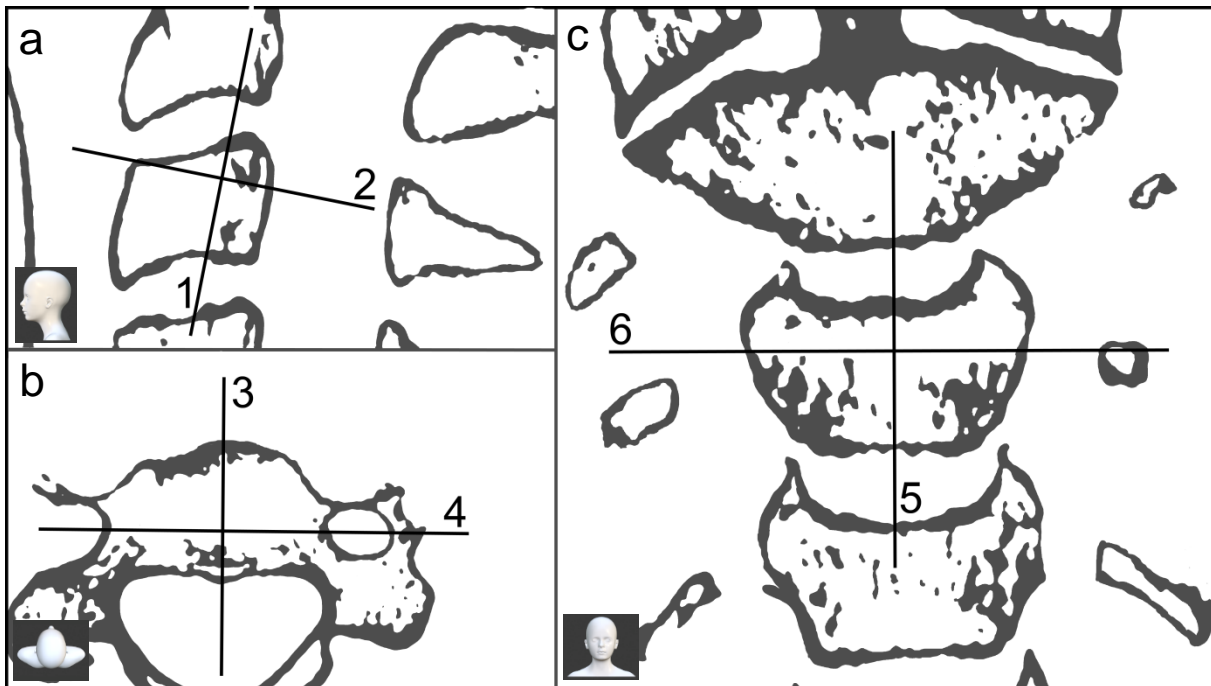
Die gedrehte Sagittalachse (2) wurde im sagittalen Schnittbild derart ausgerichtet, dass sie maximal weit kranial im WK und an mindestens einem Punkt zentral durch die Kortikalis der Wirbelkörperdeckplatte verlief (Abbildung 47a).

In Einzelfällen, in denen die Foramina transversaria in der gewählten Einstellung nicht ausreichend dargestellt waren, konnten diese durch Betrachtung kaudaler Transversalebene desselben Wirbelkörpers ermittelt werden.

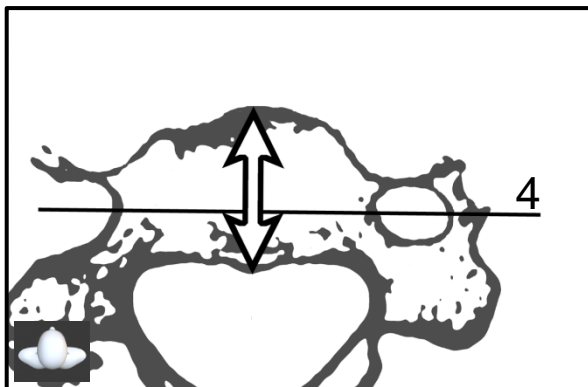
Im transversalen Schnittbild erfolgte die Messung der Deckplattenlänge anteroposterior von der äußeren Kortikalis der ventralen Wirbelkörperspitze entlang der Wirbelkörpermittellinie zur äußeren Kortikalis der Hinterkantenmitte (Abbildung 48).

#### Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser):

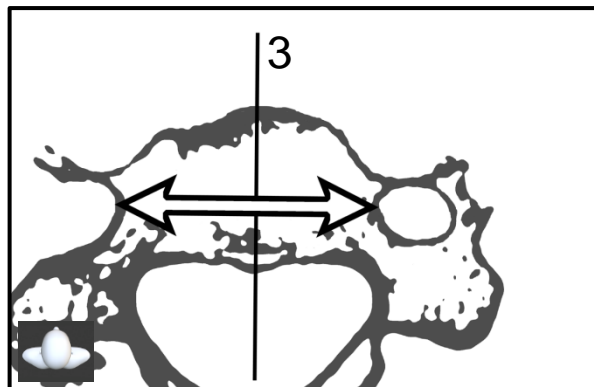
Die Deckplattenbreite wurde im transversalen Schnittbild als die hinterkantenparallele kürzeste Verbindungslinie der Foramina transversaria einschließlich der äußeren Kortikalis definiert (Abbildung 49).



**Abb. 47:** Deckplatte HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung



**Abb. 48:** Messung Deckplattenlänge  
 (sagittaler Durchmesser) (Pfeil)  
 4: Transversalachse; schematische  
 Darstellung



**Abb. 49:** Messung Deckplattenbreite  
 (transversaler Durchmesser) (Pfeil)  
 3: Sagittalachse; schematische  
 Darstellung



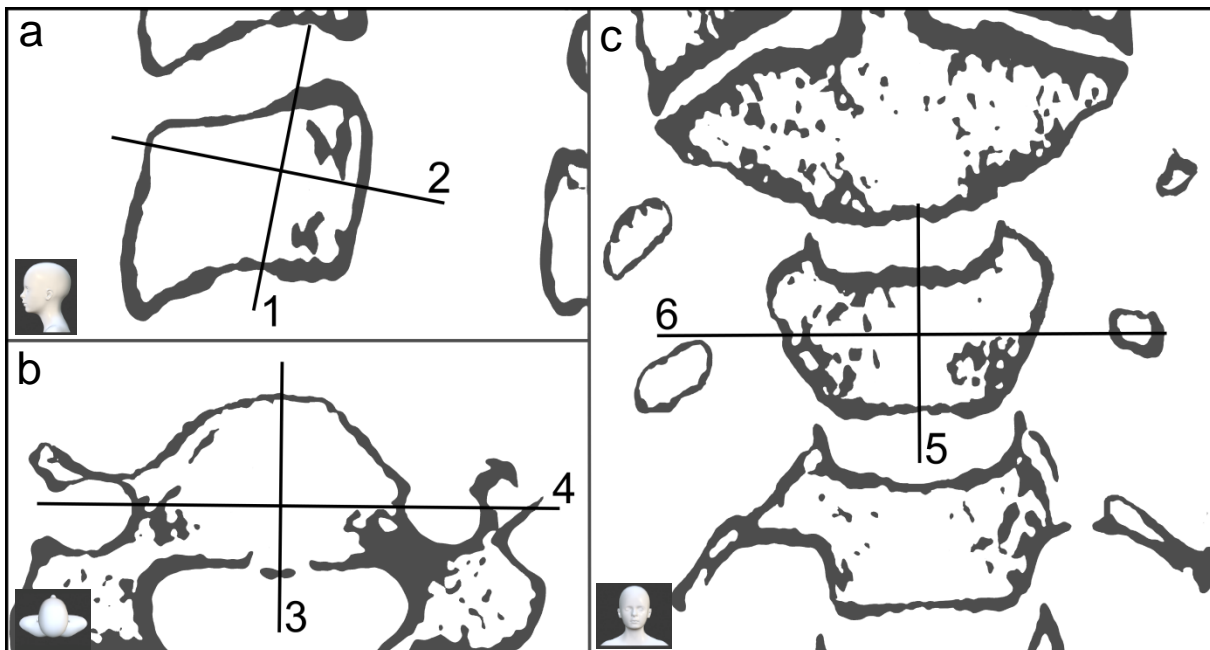
Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser):

Die transversale Schicht wurde so gewählt, dass die rotierte Sagittalachse im sagittalen Schnittbild (2) einen Schnittpunkt mit der Mitte der Wirbelkörperhinterkante aufwies (Abbildung 50a). Die Hinterkante wurde als Bereich zwischen Kreuzungspunkt von Wirbelkörperunterkante und -hinterkante und dem Kreuzungspunkt der Wirbelkörperhinterkante mit der Wirbelkörperdeckplatte definiert.

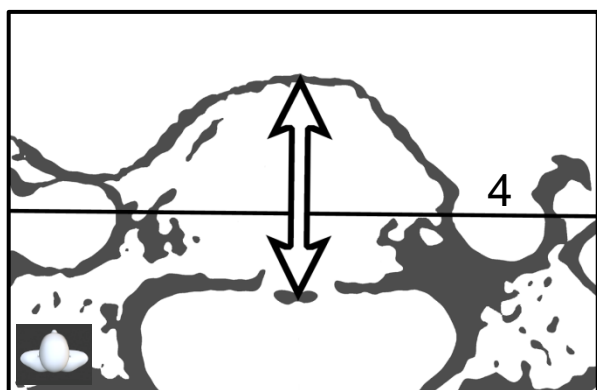
Zur Bestimmung der zentralen Wirbelkörperlänge erfolgte die Messung im transversalen Schnittbild unter Einschluss der äußeren Kortikalis anteroposterior von der Wirbelkörperspitze entlang der Wirbelkörpermittellinie zur Mitte der Hinterkante (Abbildung 51).

Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser):

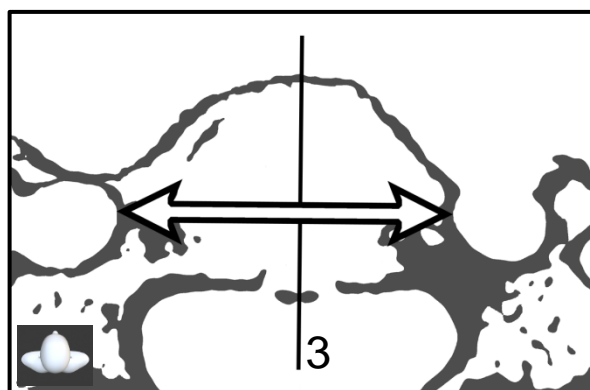
Es wurde die kürzeste Verbindungsstrecke der Foramina transversaria im transversalen Schnittbild, parallel zum Verlauf der vorher gedrehten Transversalachse (4), gemessen (Abbildung 52).



**Abb. 50:** Wirbelkörper zentral HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung



**Abb. 51:** Messung Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser) (Pfeil)  
4: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 52:** Messung Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) (Pfeil)  
3: Sagittalachse; schematische Darstellung

#### Pedikelhöhe HWK 3-7 (äußere Kortikalis):

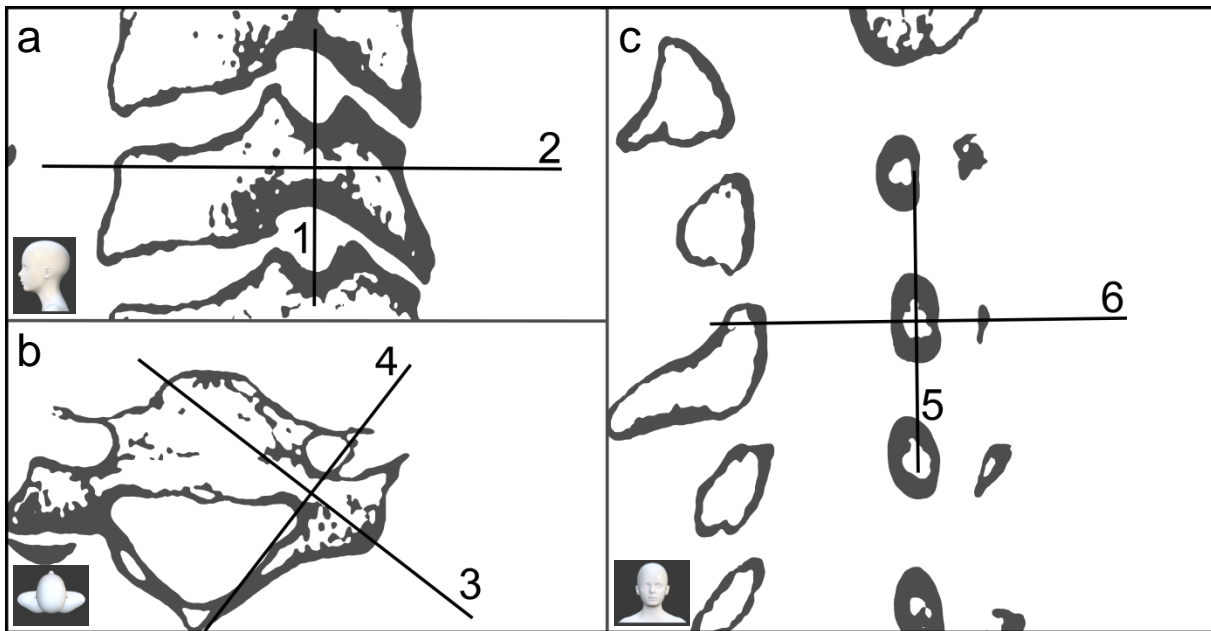
Die Ebeneneinstellung zwecks Pedikelmessung erfolgte analog zu der oben beschriebenen Vorgehensweise.

Im sagittalen Schnittbild wurde die gedrehte Longitudinalachse (1) auf den Bereich des Pedikels positioniert, der rechtwinklig zum Verlauf der Pedikelachse (2) die geringste Höhe aufwies (Abbildung 53a).

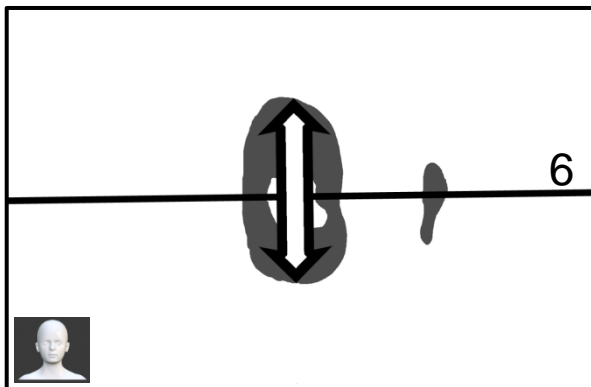
Im frontalen Schnittbild wurde der longitudinalen Pedikelachse (5) folgend, einschließlich der äußeren Kortikalisgrenzen, die Pedikelhöhe bestimmt (Abbildung 54). Dies entsprach in einigen Fällen nicht der im Schnittbild sichtbaren maximalen Ausdehnung, sondern der Höhe an der Stelle, an der die simulierte Schraube mittig durch den Pedikel verlief.

#### Pedikelhöhe HWK 3-7 (innere Kortikalis):

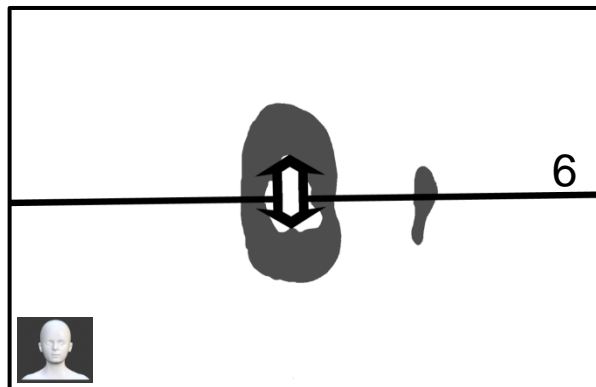
Die Pedikelhöhe zwischen den inneren Kortikalisgrenzen wurde im frontalen Schnittbild erfasst. Es wurde analog zur vorhergehenden Messung der longitudinalen Pedikelachse (5) folgend die Pedikelhöhe zwischen den inneren Kortikalisgrenzen bestimmt (Abbildung 55).



**Abb. 53:** Pedikel HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild  
 oben links: Sagittalschnitt, 1: Longitudinalachse, 2: Sagittalachse  
 unten links: Transversalschnitt, 3: Sagittalachse, 4: Transversalachse  
 rechts: Frontalschnitt, 5: Longitudinalachse, 6: Transversalachse  
 schematische Darstellung



**Abb. 54:** Messung Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) (Pfeil)  
 6: Transversalachse; schematische Darstellung



**Abb. 55:** Messung Pedikelhöhe (innere Kortikalis) (Pfeil)  
 6: Transversalachse; schematische Darstellung

### 2.4.3 Anmerkungen

#### Osteophytenbildung am Wirbel:

Osteophytäre Kantenausziehungen und Randwulstungen können zu Verformungen des Wirbels führen. Diese Wucherungen wurden bei den Messungen eingeschlossen, solange sie durch eine durchgehende Kortikalis mit der zu betrachtenden Struktur verbunden waren. Zeigte die Osteophyten-Kortikalis einen Dichteabfall gegenüber der Wirbel-Kortikalis, wurde die osteophytäre Randzacke nicht in die Messung einbezogen. Die Messung wurde in einem solchen Fall an einem sinnvollen vorherigen Punkt durchgeführt, sodass sie einer idealisierten Messlinie entsprach. Dieser Endpunkt der Messung konnte durch Betrachten der folgenden Bildabschnitte ermittelt werden.

Wenn bei nach kaudal gerichteten Osteophyten die idealisierte Kurvenlinie der Wirbelkörperkante klar abgrenzbar war, wurde der Spondylophyt bei einer Wirbelkörperhöhenmessung nicht in die Messung eingeschlossen.

#### Anatomische Variante der Lamina und des Processus spinosus:

Die Laminalängenmessung sollte am Übergang der kontralateralen Lamina zum Processus spinosus beginnen und mittig durch die Lamina führen. Dies war in einigen Fällen durch anatomische Variationen und Verdrehungen in den CT-Bildern nicht möglich, sodass der Ansatz des Processus spinosus in diesen Fällen mitgemessen wurde.

#### Anatomische Variante der Lamina:

Die Anatomie der Lamina zeigte fallweise sehr schlanke Durchmesser, sodass die innere Kortikalis diskontinuierlich abgebildet war. In solchen Fällen erfolgte die optische Adaptierung der Messstrecke derart, dass der nächstgelegene Spongiosaanteil in seiner Ausdehnung gemessen wurde.

### Spondylarthrose:

Bei starker Degeneration der Facettengelenke entstehen knöcherne Anbauten, die bei der Messung der Massa lateralis Parameter von Bedeutung sind. Hier gilt, dass die osteophytären Anbauten mitgemessen wurden, solange sie eine durchgängige intensive Kortikalis aufwiesen und mit der Massa lateralis verbunden waren. War dies nicht der Fall, wurden sie unberücksichtigt gelassen; die Messung endete dann an einem sinnvollen Punkt davor, der die ursprüngliche Größe der Massa lateralis abbildete. Dieser Endpunkt der Messung wurde durch Betrachten der folgenden und vorherigen Schnittebenen ermittelt.

### Bestimmung der Lamina- und Pedikelhöhe:

In einigen Fällen verfügten Lamina oder Pedikel über zwei potentielle Möglichkeiten, die Höhe der Spongiosabereiche zu messen. Dies ergab sich, wenn sich nach der oben beschriebenen Einstellung zwei Spongiosabereiche innerhalb der Struktur befanden. War die innere Kortikalisgrenze nicht klar abzugrenzen, wurde als Standard festgesetzt, in solch einem Fall nur die größere Spongiosaausdehnung zu messen.

#### 2.4.4 Degeneration

Zur Erfassung des Degenerationsausmaßes der Halswirbelsäule wurden fünf Parameter erhoben. Das Vorhandensein von Sklerose, Chondrose, Spondylose, Retrospondylose und Spondylarthrose wurde mittels nachstehender Einteilungen erfasst. Diese Einteilungen wurden in Anlehnung an die Konsensempfehlung von Bolm-Audorff et al. erstellt (Bolm-Audorff et al., 2005). Anschließend wurde für die jeweilige Degenerationsform ein Index berechnet. Zur Ermittlung des Index wurde die dokumentierte Einschätzung des Degenerationsgrades in einen dem Grad entsprechenden Punktwert übersetzt. Daraufhin wurde in verschiedenen Altersgruppen der Mittelwert der vergebenen Punkte bestimmt. Dieser Mittelwert wurde als Index definiert, der das Degenerationsausmaß angab. Die Klassifikation der Degeneration umfasste keine Unterscheidung der rechten und linken Seite und wurde für jede Wirbelhöhe einzeln ermittelt.

Sklerose:

- I° optisch wahrnehmbare vermehrte Sklerose
- II° > 1mm in die Spongiosa hineinziehende Sklerose der WK-Abschlussplatten

Chondrose:

- I° Höhenminderung des Zwischenwirbelraumes mittig >  $\frac{1}{5}$  bis  $\frac{1}{2}$
- II° Höhenminderung des Zwischenwirbelraumes mittig >  $\frac{1}{2}$
- III° für die HWS nicht vergeben
- IV° Ankylosierende Chondrose

Spondylose:

- I° bis 1 mm
- II° 1 bis 3 mm
- III° über 3 mm
- IV° Tendenzielle und vollständige Brückenbildung

Retrospondylose:

- I° bis 2 mm
- II° über 2 mm

Spondylarthrose:

- I° vermehrte Sklerose der Wirbelgelenke erkennbar
- II° Grad I + Verplumpungen oder Randanbauten der Wirbelgelenke

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Übersicht der Messparameter

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Parameter bestimmt:

**Tab. 1:** Übersicht der Messparameter

Parameter	Halswirbel/Seite
Wirbelkörperhöhe mit Dens	C2
Wirbelkörperhöhe ohne Dens	C2
Densbreite koronar (Densbasis)	C2
Densbreite sagittal (Tiefe)	C2
Wirbelkörperhöhe ventral	C3-C7
Wirbelkörperhöhe zentral	C3-C7
Wirbelkörperhöhe dorsal	C3-C7
Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser)	C3-C7
Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser)	C3-C7
Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser)	C3-C7
Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser)	C3-C7
Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser)	C2-C7
Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser)	C2-C7
Laminallänge	C2-C7 rechts und links
Laminabreite (äußere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Laminabreite (innere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Laminawinkel	C2-C7 rechts und links
Laminahöhe (äußere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Laminahöhe (innere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Pedikellänge	C2-C7 rechts und links
Pedikelbreite (äußere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Pedikelbreite (innere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Pedikelwinkel	C2-C7 rechts und links
Pedikelhöhe (äußere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Pedikelhöhe (innere Kortikalis)	C2-C7 rechts und links
Pedikelkortikalis	C2 rechts und links
Massa lateralis Fläche	C2-C7 rechts und links
Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser)	C2-C7 rechts und links
Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser)	C2-C7 rechts und links
Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser)	C2-C7 rechts und links
Massa lateralis Höhe	C2-C7 rechts und links

Nachfolgend werden wichtige Messergebnisse näher aufgeführt. Detaillierte tabellarische Aufstellungen aller Messwerte, Messergebnisse und Statistiken (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert, Standardfehler, Patientenzahl der

jeweiligen Messung) für das Gesamtkollektiv sowie eine seitengetrennte Auswertung befinden sich im Anhang (Tabellen 49-50).

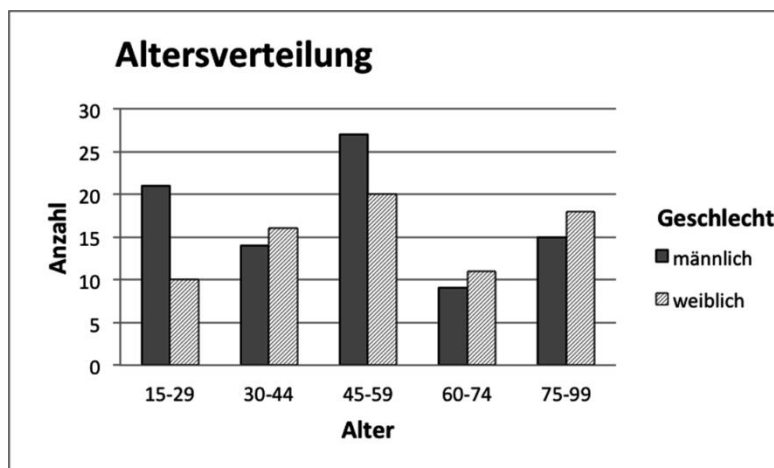
### 3.2 Patientenkollektiv

Die Untersuchung umfasst insgesamt Bilddatensätze von 161 Polytrauma-Patienten in einem Alter von 17 bis 97 Jahren, 46,58 % weiblichen und 53,42 % männlichen Geschlechts. Das Durchschnittsalter beträgt  $53 \pm 21,68$  Jahre.

In der Altersgruppe 17-29 Jahren ist ein deutlicher Geschlechterunterschied bezüglich der Häufigkeit auszumachen. 21 männliche Patienten und 10 weibliche Patienten sind in dieser Kategorie vertreten (Tabelle 2, Abbildung 56). Bei den über 60-Jährigen Patienten stellt sich eine umgekehrte Verteilung dar: Die Altersgruppe setzt sich aus 29 weiblichen und 24 männlichen Patienten zusammen.

**Tab. 2:** Altersverteilung Patientenkollektiv

Alter (Jahre)	Anzahl männlicher Patienten	Anzahl weiblicher Patienten	Anzahl Gesamt
15-29	21	10	31
30-44	14	16	30
45-59	27	20	47
60-74	9	11	20
75-99	15	18	33



**Abb. 56:** Graphische Darstellung der Altersverteilung des Patientenkollektivs



### 3.3 Geschlechtsunterschiede

Beim männlichen Patientenkollektiv werden außer bei der C2-Laminabreite durchschnittlich größere lineare und anguläre Messwerte der untersuchten knöchernen Strukturen ermittelt als bei der weiblichen Patientengruppe. Dabei sind die Geschlechtsunterschiede bei 136 von 153 Parametern signifikant. Entsprechende p-Werte sind in Tabelle 51 im Anhang aufgeführt. Bei der C2-Laminabreite fallen die Messwerte der weiblichen Patienten im Durchschnitt größer aus als die der männlichen, allerdings ist der Unterschied hierbei nicht signifikant (p-Wert 0,499).

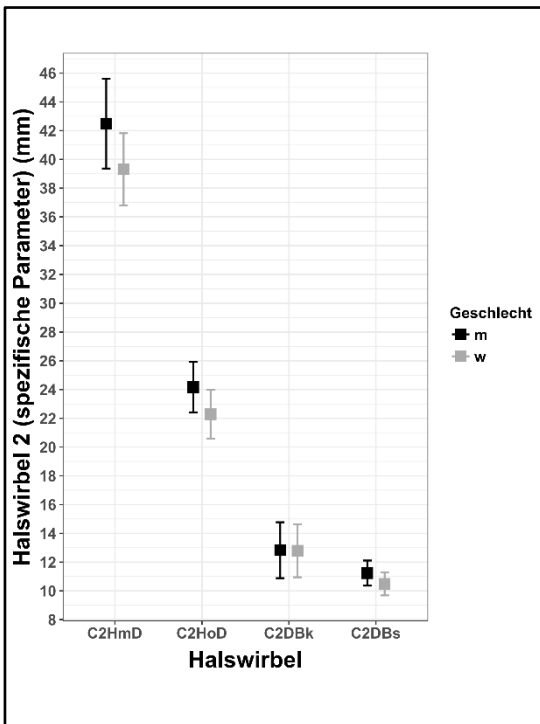
### 3.4 Messergebnisse

#### 3.4.1 C2-spezifische Parameter

Die durchschnittliche Wirbelkörperhöhe des Axis beträgt mit Dens 41,01 mm und ohne Dens 23,30 mm (Tabelle 3). Die koronare Densbreite zeigt Durchschnittswerte von 12,81 mm, der Mittelwert des Patientenkollektivs bei der sagittalen Densbreite liegt bei 10,89 mm. Die Densbreite zeigt sowohl sagittal, als auch vor allem koronar, nur geringe Geschlechtsunterschiede (Abbildung 57).

**Tab. 3:** C2-spezifische Parameter

Parameter	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
C2 Höhe mit Dens	42,49	3,12	39,31	2,51	41,01	3,25
C2 Höhe ohne Dens	24,17	1,75	22,28	1,69	23,30	1,96
C2 Densbreite koronar	12,83	1,94	12,79	1,84	12,81	1,89
C2 Densbreite sagittal	11,23	0,87	10,49	0,80	10,89	0,92



**Abb. 57:** Mittelwert C2-spezifischer Parameter mit Standardabweichungen, C2HmD: C2 Höhe mit Dens, C2HoD: C2 Höhe ohne Dens, C2DBk: C2 Densbreite koronar (Densbasis), C2DBs: C2 Densbreite sagittal (Tiefe)

### 3.4.2 Wirbelkörperhöhe

Die gemessenen Wirbelkörperhöhen liegen in einem Bereich zwischen 7,69 mm und 18,92 mm. Männliche Patienten verfügen im Durchschnitt über höhere Wirbelkörper als weibliche Personen (Tabellen 4-6, Abbildungen 58-60). Beim Vergleich der ventralen, zentralen und dorsalen Messungen zeigt sich ein Abnehmen der Höhe von kranial nach kaudal mit einem Minimum bei C5 (Wirbelkörperhöhe zentral) bzw. C6 (Wirbelkörperhöhe ventral und dorsal) und ein anschließendes Ansteigen der Höhe bei C7. Der siebte Halswirbel verfügt unter den vermessenen Wirbeln über den höchsten Wirbelkörper.

**Tab. 4:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe ventral mit Standardabweichung in mm

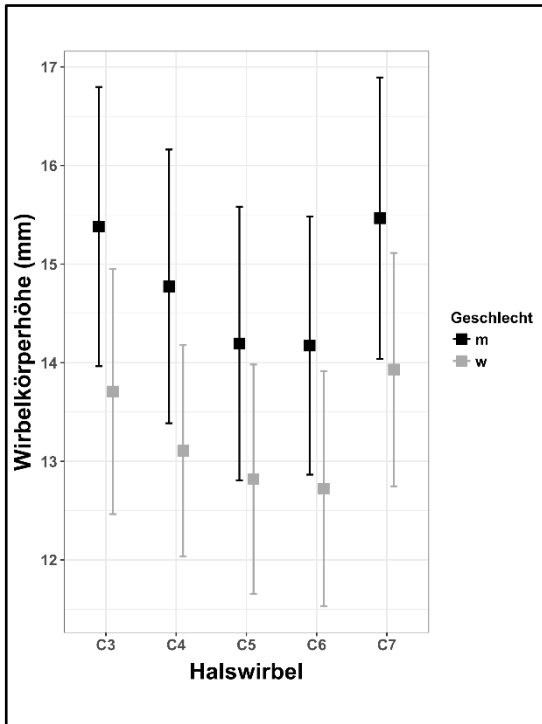
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	15,38	1,42	13,71	1,24	14,60	1,57
4	14,77	1,39	13,11	1,07	14,00	1,50
5	14,19	1,39	12,82	1,16	13,55	1,46
6	14,17	1,31	12,72	1,19	13,50	1,45
7	15,47	1,43	13,93	1,18	14,75	1,52

**Tab. 5:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe zentral mit Standardabweichung in mm

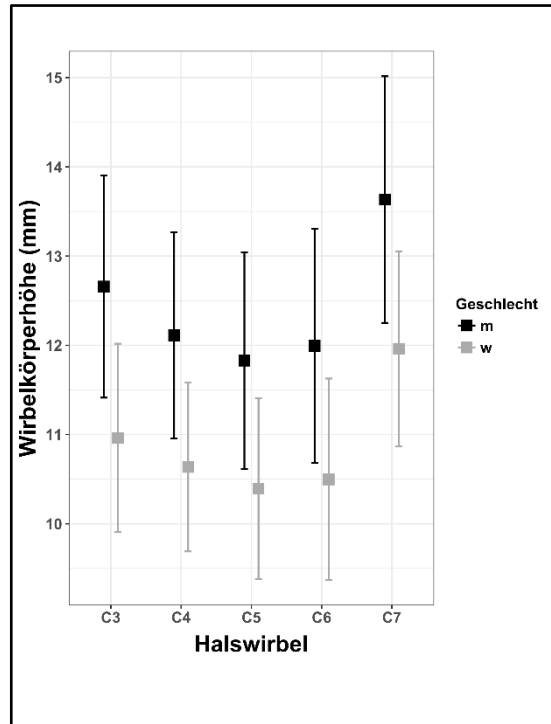
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	12,66	1,24	10,96	1,06	11,87	1,43
4	12,11	1,15	10,64	0,95	11,42	1,29
5	11,83	1,21	10,39	1,01	11,16	1,33
6	11,99	1,31	10,50	1,13	11,30	1,44
7	13,63	1,38	11,96	1,09	12,85	1,51

**Tab. 6:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe dorsal mit Standardabweichung in mm

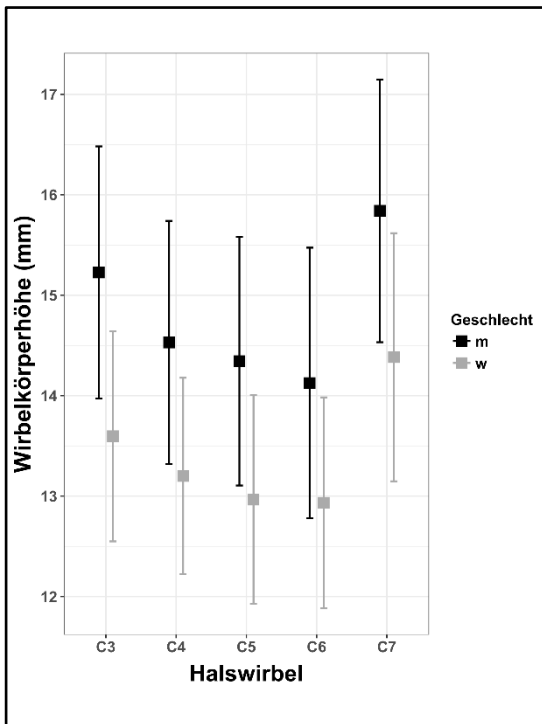
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	15,23	1,25	13,60	1,05	14,47	1,42
4	14,53	1,21	13,20	0,98	13,91	1,29
5	14,34	1,24	12,97	1,04	13,71	1,34
6	14,13	1,35	12,93	1,05	13,57	1,35
7	15,84	1,31	14,38	1,24	15,16	1,46



**Abb. 58:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe ventral mit Standardabweichungen, C3-C7



**Abb. 59:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe zentral mit Standardabweichungen, C3-C7



**Abb. 60:** Mittelwert der Wirbelkörperhöhe dorsal mit Standardabweichungen, C3-C7

### 3.4.3 Wirbelkörperlänge und -breite

Wirbelkörperlänge und -breite werden auf drei Ebenen gemessen: auf Höhe der Deckplatte, zentral im Wirbelkörper und im Bereich der Bodenplatte. Auf allen drei Ebenen weisen die Wirbelkörper einen größeren transversalen als sagittalen Durchmesser auf. Die Wirbelkörperlänge nimmt von der Deck- zur Bodenplatte mit Ausnahme von C7 zu (Tabellen 7, 9, 11, Abbildungen 61, 63, 65). Die Wirbelkörperbreite zeigt eine entgegengesetzte Entwicklung mit einer Abnahme des Bodenplattendurchmessers gegenüber der Deckplatten- und zentralen Wirbelkörperbreite (Tabellen 8, 10, 12, Abbildungen 62, 64, 66). Bezogen auf die gesamte HWS ist mit wenigen Ausnahmen eine tendenzielle Zunahme der Längen und Breiten vergleichbarer Messparameter von kranial nach kaudal auszumachen. Die Mittelwerte der linearen Messparameter stellen sich im männlichen Patientenkollektiv durchweg größer dar als in der weiblichen Patientengruppe.

**Tab. 7:** Mittelwert der Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	14,80	1,68	13,34	1,33	14,12	1,69
4	14,84	1,78	13,32	1,39	14,13	1,78
5	15,09	1,78	13,45	1,62	14,33	1,89
6	16,51	2,22	15,03	2,04	15,83	2,26
7	18,56	2,73	16,21	2,00	17,47	2,68

**Tab. 8:** Mittelwert der Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	26,35	1,65	24,79	1,62	25,62	1,81
4	26,50	1,89	25,00	1,66	25,80	1,93
5	27,63	1,83	26,10	1,60	26,93	1,88
6	28,82	2,30	27,40	1,74	28,16	2,17
7	32,05	2,81	30,80	1,97	31,47	2,53

**Tab. 9:** Mittelwert der Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	16,44	1,60	14,82	1,60	15,69	1,79
4	16,35	1,67	14,57	1,74	15,52	1,92
5	16,39	1,91	14,46	1,89	15,50	2,13
6	17,59	2,53	15,66	1,94	16,70	2,46
7	18,14	2,32	15,76	1,70	17,03	2,37

**Tab. 10:** Mittelwert der Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

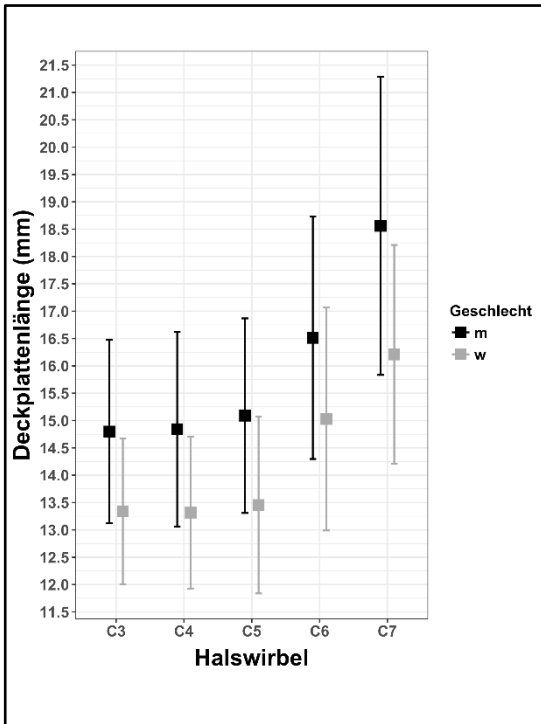
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
3	25,31	1,72	23,45	1,49	24,44	1,86
4	25,68	1,90	24,34	1,79	25,06	1,96
5	27,72	2,06	26,09	1,88	26,97	2,14
6	29,54	2,19	27,79	2,44	28,73	2,46
7	32,65	2,42	30,68	2,69	31,72	2,73

**Tab. 11:** Mittelwert der Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

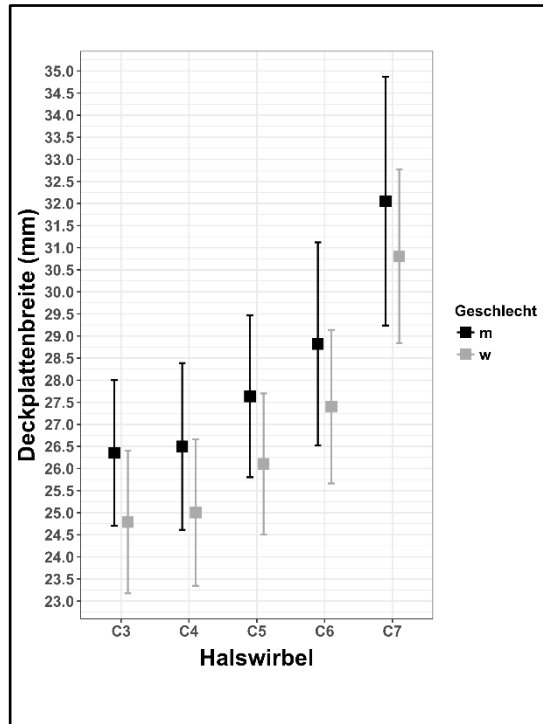
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	16,89	1,51	15,08	1,26	16,05	1,66
3	16,85	1,56	15,05	1,50	16,01	1,77
4	16,88	1,55	15,19	1,71	16,09	1,83
5	17,95	2,33	15,98	1,97	17,04	2,38
6	19,01	2,52	16,75	2,19	17,97	2,63
7	19,15	2,10	16,45	2,02	17,88	2,46

**Tab. 12:** Mittelwert der Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

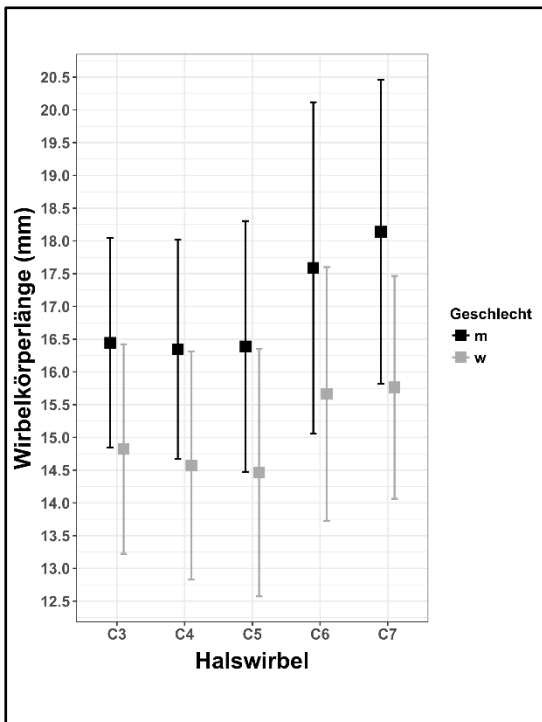
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	17,36	2,02	16,54	1,70	16,98	1,92
3	18,64	2,20	17,45	1,74	18,08	2,08
4	19,29	2,20	18,63	2,30	18,98	2,26
5	20,83	2,57	19,53	1,84	20,23	2,35
6	25,08	2,94	22,72	2,19	23,99	2,87
7	29,18	2,31	26,57	2,34	27,95	2,66



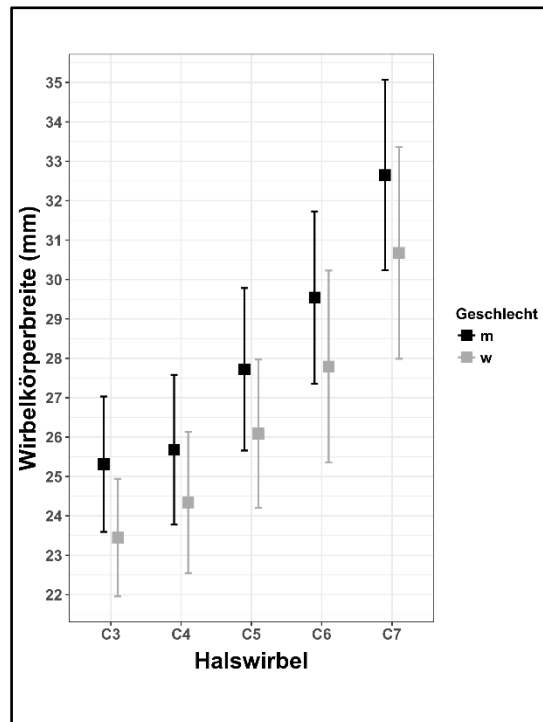
**Abb. 61:** Mittelwert der Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C3-C7



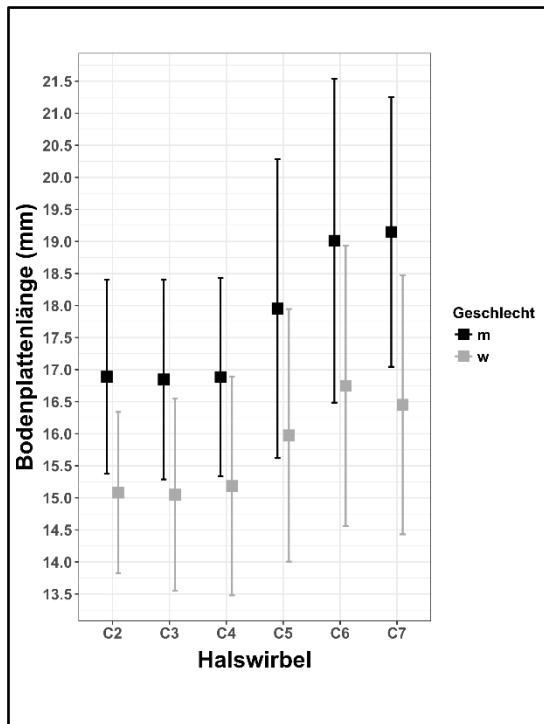
**Abb. 62:** Mittelwert der Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C3-C7



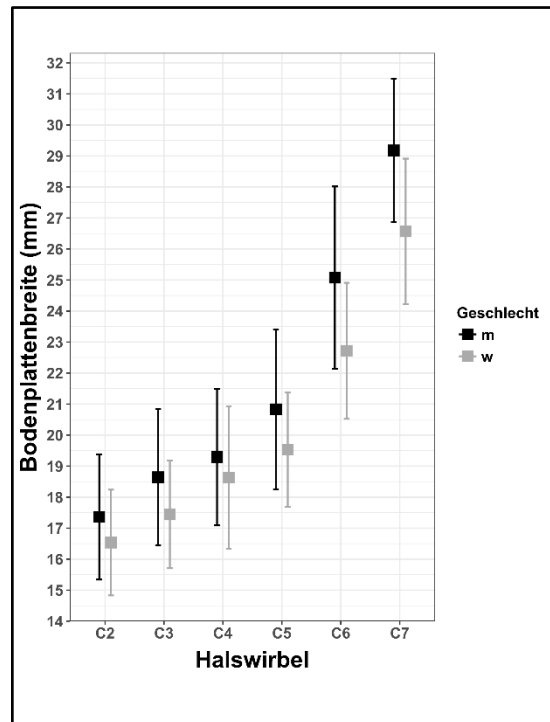
**Abb. 63:** Mittelwert der Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C3-C7



**Abb. 64:** Mittelwert der Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C3-C7



**Abb. 65:** Mittelwert der Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 66:** Mittelwert der Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C2-C7

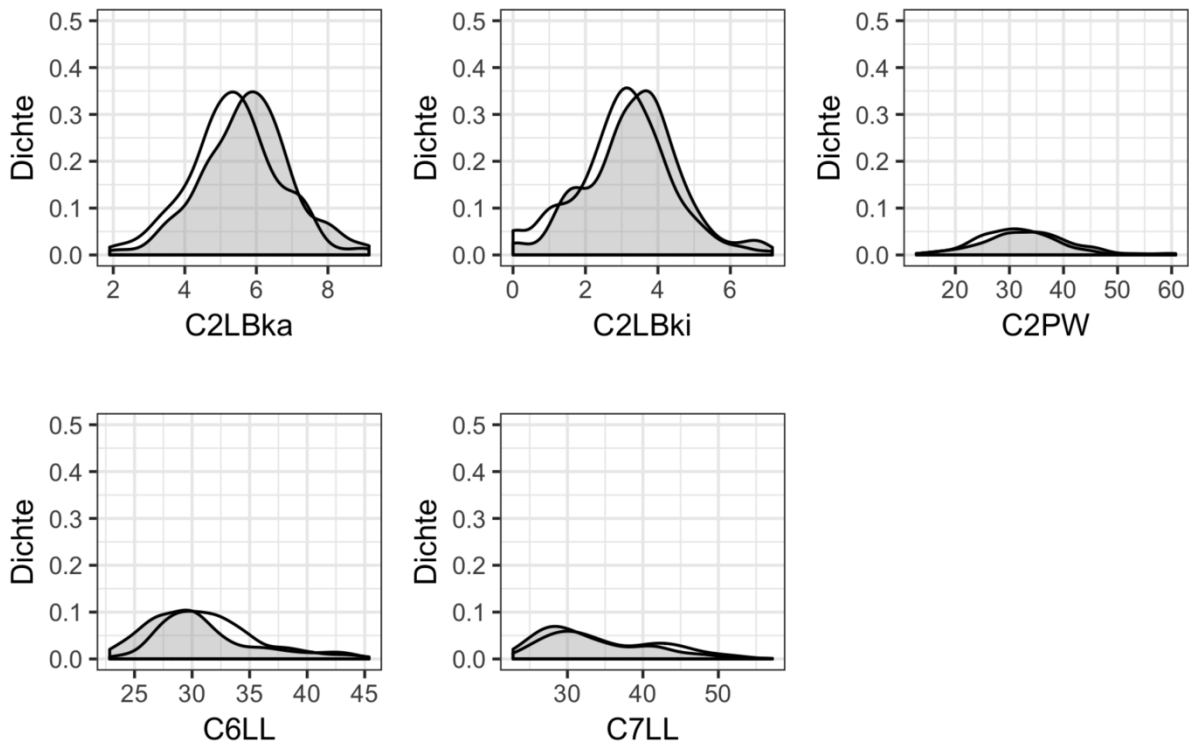
#### 3.4.4 Messparameter im Seitenvergleich

Um zu ermitteln, ob ein signifikanter Unterschied der Messwerte im Seitenvergleich zwischen rechts und links vorliegt, wird ein Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben mit anschließender Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Dabei zeigen fünf der 101 getesteten paarigen Messparameter einen signifikanten Unterschied. Bei diesen Parametern handelt es sich um die Laminabreite C2 (äußere Kortikalis), die Laminabreite C2 (innere Kortikalis), den Pedikelwinkel C2 sowie die Laminalängen C6 und C7.

Die ermittelten Unterschiede haben für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Fragestellungen keine Relevanz, sodass aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine seitengetrennte Aufführung dieser fünf Parameter in Tabellen und Abbildungen verzichtet wird, zumal der visuelle Unterschied zwischen den Ergebnissen von rechts und links in diesen Fällen sehr gering ausfällt (Abbildung 67). Es zeigt sich zudem eine annähernd



symmetrische Verteilung in den density plots. Im Anhang ist eine seitengetrennte Darstellung der Parameter einzusehen.



**Abb. 67:** Häufigkeitsverteilung der Messergebnisse mit signifikantem Seitenunterschied X-Achse in mm, C2LBka: C2 Laminabreite (äußere Kortikalis), C2LBki: C2 Laminabreite (innere Kortikalis), C2PW: C2 Pedikelwinkel, C6LL: C6 Laminalänge, C7LL: C7 Laminalänge, rechts: transparent, links: grau

### 3.4.5 Laminaparameter

Bis auf die Laminabreite (innere und äußere Kortikalis) des 2. Halswirbels sind alle Mittelwerte der betrachteten Laminaparameter im männlichen Kollektiv größer als bei den weiblichen Patienten (Tabellen 13-18, Abbildungen 68-73). Bis auf beim zweiten, dritten und siebten Halswirbel sind die Laminabreiten im Geschlechtervergleich signifikant verschieden. Die durchschnittlichen Laminalängen betragen im Gesamtkollektiv zwischen 31,11 mm (C6) und 34,03 mm (C7).

Die Laminabreite (äußere Kortikalis) nimmt im Mittel von C2 nach kaudal bis zu einem Minimum bei C5 (2,09 mm) ab und anschließend bis C7 (4,39 mm) wieder zu. Die im

Durchschnitt breitesten Lamina befindet sich auf Höhe des 2. Halswirbels (5,57 mm). Die auf die innere Kortikalis bezogene durchschnittliche Laminabreite zeigt einen ähnlichen Werteverlauf mit einem Minimum bei C5 (0,56 mm) und deutlich höheren Werten bei C2 (3,18 mm) und C7 (2,47 mm). Der Sonderfall einer komplett kortikalen Durchbauung mit entsprechendem Fehlen spongöser Anteile wird im Kapitel „durchgängig kortikaler Aufbau“ näher betrachtet.

Auf allen betrachteten Ebenen der HWS sind die Mittelwerte der Laminahöhe (äußere Kortikalis) größer als die der Laminabreite (äußere Kortikalis). Die Mittelwerte der Laminahöhe (äußere Kortikalis) nehmen von C2 (12,07 mm) bis zum Minimum bei C4 (10,97 mm) ab und steigen anschließend nach kaudal bis zum höchsten Wert bei C7 (16,18 mm) an. Die breiteste Spanne zwischen den inneren Kortikalisgrenzen zeigt sich bei der Laminahöhe des 7. Halswirbels (11,52 mm), die geringste durchschnittliche Spanne auf Höhe der C5-Lamina mit 4,12 mm. Abbildung 74 zeigt eine überwiegend symmetrische Messdatenverteilung der Laminabreiten und -höhen bei seitengetrennter Auswertung.

Die Mittelwerte der gemessenen Winkel, die die jeweilige Lamina mit der Sagittalachse bildet, zeigen eine tendenzielle Abnahme von C2 (41°) nach C7 (35°).

**Tab. 13:** Mittelwert der Laminalänge mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	34,49	2,75	32,63	2,79	33,62	2,92
3	34,31	3,17	32,39	3,15	33,42	3,30
4	35,19	3,68	32,55	3,25	33,97	3,73
5	34,88	4,57	32,07	3,52	33,57	4,34
6	32,32	4,64	29,72	4,03	31,11	4,55
7	34,35	7,35	33,66	7,16	34,03	7,26

**Tab. 14:** Mittelwert der Laminabreite (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	5,52	1,41	5,62	1,12	5,57	1,28
3	3,09	0,89	3,06	0,82	3,07	0,86
4	2,51	0,79	2,22	0,62	2,38	0,73
5	2,21	0,68	1,94	0,59	2,09	0,65
6	2,74	0,73	2,36	0,64	2,56	0,72
7	4,49	0,95	4,27	0,99	4,39	0,97

**Tab. 15:** Mittelwert der Laminabreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	3,15	1,44	3,22	1,20	3,18	1,33
3	1,50	2,41	1,28	0,87	1,40	1,86
4	0,92	0,89	0,59	0,62	0,77	0,80
5	0,66	0,63	0,45	0,53	0,56	0,59
6	1,14	0,70	0,84	0,61	1,00	0,68
7	2,61	0,88	2,32	0,96	2,47	0,93

**Tab. 16:** Mittelwert der Laminhöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

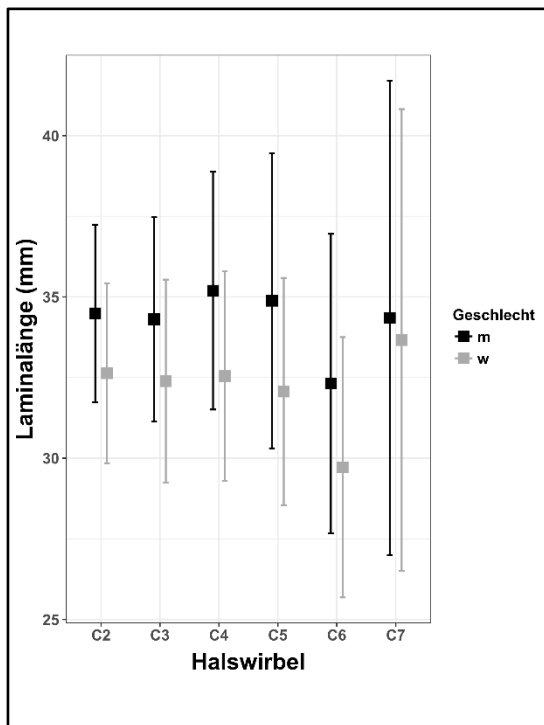
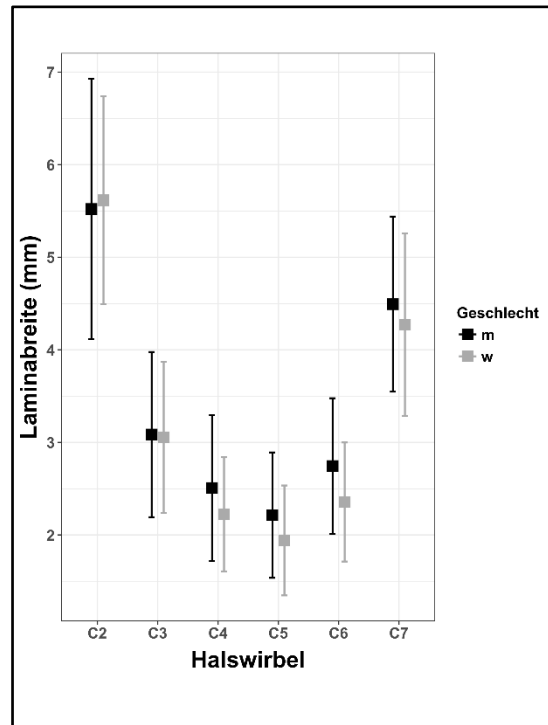
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	12,64	1,63	11,41	1,36	12,07	1,63
3	11,64	1,57	10,65	1,31	11,18	1,53
4	11,54	1,70	10,31	1,31	10,97	1,65
5	12,04	1,70	10,74	1,38	11,43	1,69
6	13,36	2,18	11,91	1,68	12,69	2,09
7	16,85	1,91	15,40	1,59	16,18	1,91

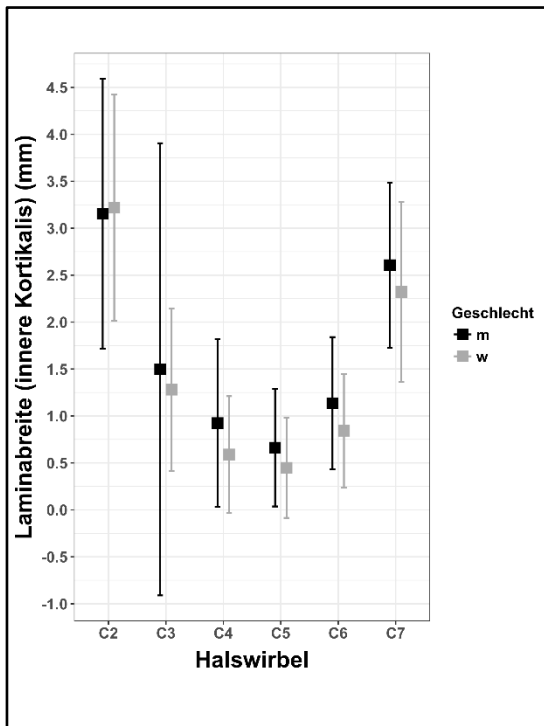
**Tab. 17:** Mittelwert der Laminhöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	8,47	2,61	7,55	1,89	8,04	2,34
3	5,94	2,82	5,00	2,68	5,51	2,79
4	4,98	3,24	3,33	3,03	4,22	3,24
5	4,81	3,58	3,33	3,29	4,12	3,53
6	7,76	3,61	5,99	3,43	6,94	3,63
7	12,22	2,35	10,71	2,50	11,52	2,53

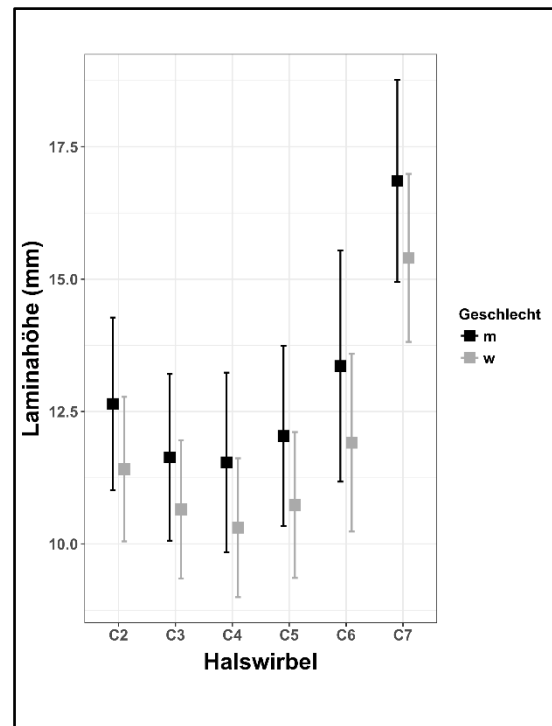
**Tab. 18:** Mittelwert der Laminawinkel mit Standardabweichung in Grad

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	42	4,70	40	4,23	41	4,54
3	39	4,71	37	4,43	38	4,65
4	39	4,44	37	4,28	38	4,47
5	39	4,16	37	3,99	38	4,23
6	38	3,98	36	3,79	37	4,03
7	36	4,04	35	4,31	35	4,17

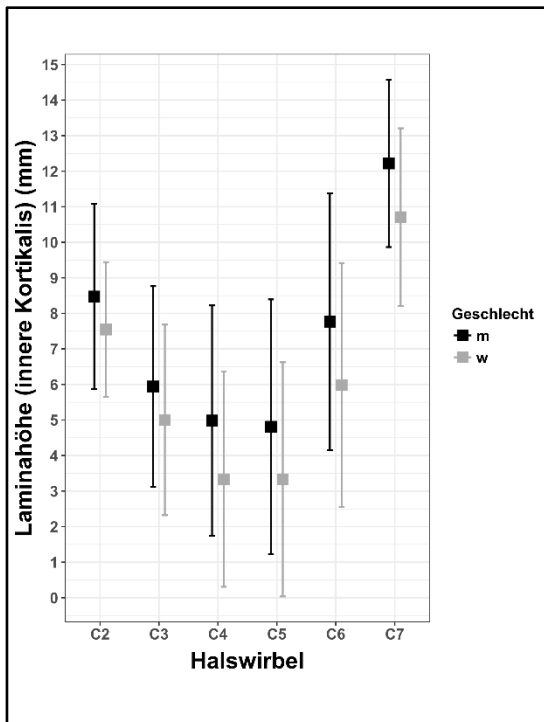
**Abb. 68:** Mittelwert der Laminallänge mit Standardabweichungen, C2-C7**Abb. 69:** Mittelwert der Laminabreite mit Standardabweichungen (äußere Kortikalis), C2-C7



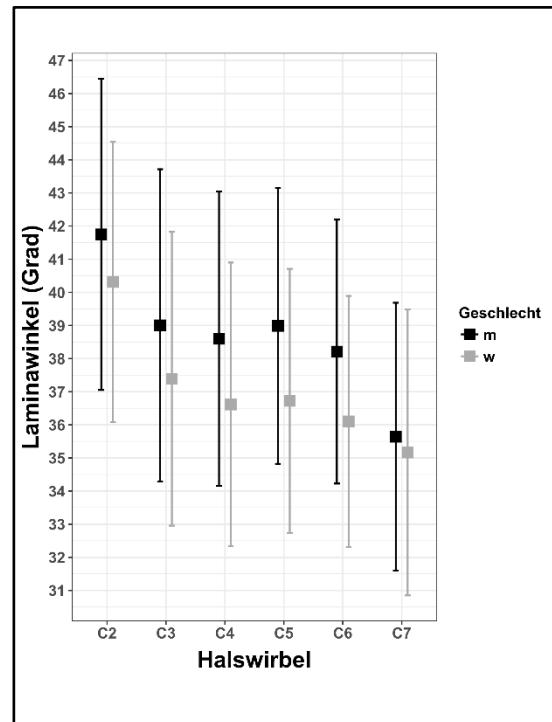
**Abb. 70:** Mittelwert der Laminabreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



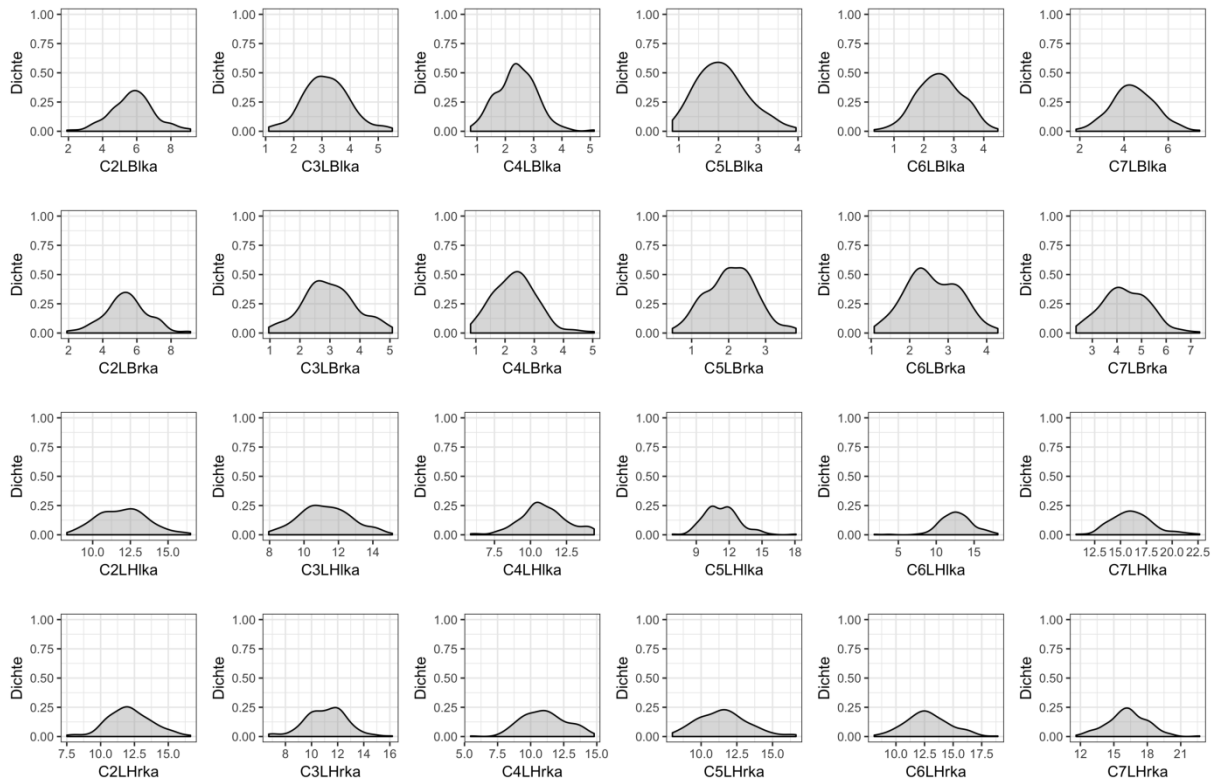
**Abb. 71:** Mittelwert der Laminahöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 72:** Mittelwert der Laminahöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 73:** Mittelwert der Laminawinkel mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 74:** Häufigkeitsverteilung der Laminabreiten und -höhen (äußere Kortikalis) C2 bis C7 im Seitenvergleich  
X-Achse in mm, Parameterabkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis

### 3.4.6 Pedikelparameter

Alle erhobenen Pedikelparameter weisen beim männlichen Patientenkollektiv im Vergleich zur weiblichen Patientengruppe höhere Durchschnittswerte auf (Tabellen 19-24, Abbildungen 75-80). Die Pedikelbreiten sind auf allen gemessenen Höhen im Geschlechtervergleich signifikant verschieden ( $p < 0,03$ ).

Die durchschnittliche Pedikellänge der Halswirbel C2 bis C7 liegt im Gesamtkollektiv zwischen 27,30 mm (C2) und 34,59 mm (C5). Auf allen vermessenen Wirbelhöhen sind die Pedikel breiter und niedriger als die Laminae (äußere Kortikalis). Es ergibt sich ein unterschiedliches Querschnittsbild der beiden Strukturen mit einem länglichen Bild der Lamina und einem runderen Querschnitt des Pedikels.

Der Verlauf der durchschnittlichen Pedikelbreite (äußere Kortikalis) zeigt eine andere Entwicklung von kranial nach kaudal als die der Laminabreiten. Die größte Pedikelbreite liegt bei C2 (6,93 mm), die geringste bei C3 (4,47 mm). Ab C4 (4,70 mm) nehmen die Mittelwerte bis C7 (6,41 mm) wieder zu. Der Werteverlauf der mittleren Pedikelbreite zwischen den inneren Kortikalisgrenzen ist ähnlich. Die maximale Breite liegt auf Höhe des zweiten Wirbels (4,01 mm), die geringste bei C3 (1,81 mm). Nach kaudal nimmt die Breite anschließend bis C7 (3,97 mm) zu.

Die Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) ist durch höhere Durchschnittswerte gekennzeichnet als die Pedikelbreite (äußere Kortikalis) desselben Wirbelsäulenabschnittes. Die ermittelten Durchschnittshöhen (äußere Kortikalis) liegen in einem Bereich zwischen 5,97 mm (C6) und 10,07 mm (C2). Die Mittelwerte der Pedikelhöhen der Abschnitte C3 bis C7 befinden sich in einem relativ engen Bereich zwischen 5,97 mm und 6,76 mm. Analog dazu zeigen die Pedikelhöhen, bezogen auf die Höhe zwischen den inneren Kortikalisgrenzen, zwischen C3 und C7 nur geringe Mittelwertunterschiede in einem Bereich von 2,31 mm und 3,55 mm. Beim zweiten Halswirbel ist auch bei der Pedikelhöhe (innere Kortikalis) im Durchschnitt die maximale Höhe gegeben (6,18 mm). Abbildung 81 zeigt eine überwiegend symmetrische Messdatenverteilung der Pedikelbreiten und -höhen bei seitengetrennter Auswertung.

Im Gegensatz zu den tendenziell von kranial nach kaudal spitzer werdenden Laminawinkeln zeigen die Mittelwerte der Pedikelwinkel mit  $51^\circ$  den höchsten Wert bei C4. Von diesem Maximum ausgehend werden die Winkel durchschnittlich sowohl nach kranial bis C2 ( $32^\circ$ ), als auch nach kaudal bis C7 ( $34^\circ$ ) spitzer. Die Mittelwerte der Pedikelwinkel haben über die verschiedenen Halswirbelsäulenabschnitte betrachtet eine Spanne von  $19^\circ$ . Die Laminawinkel zeigen demgegenüber eine deutlich geringere Spanne von  $6^\circ$ .

Bei 37,38 % des Patientenkollektivs stellt sich der Pedikelkortikalisquerschnitt auf Höhe des zweiten Halswirbels „kontinuierlich“ dar. Die nicht unterbrochene und nicht kontrastgeminderte Kortikalis ist häufiger beim weiblichen Patientenkollektiv vorhanden (39,6 %) als bei der männlichen Patientengruppe (35,47 %) (Abbildung 82).

**Tab. 19:** Mittelwert der Pedikellänge mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	28,20	3,37	26,24	2,78	27,30	3,26
3	33,30	3,29	30,47	3,14	31,98	3,51
4	35,11	2,98	32,23	2,95	33,77	3,30
5	35,83	2,93	33,16	2,91	34,59	3,21
6	35,71	3,57	32,46	3,05	34,20	3,71
7	32,35	3,32	28,87	2,77	30,74	3,53

**Tab. 20:** Mittelwert der Pedikelbreite (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	7,39	2,00	6,41	1,93	6,93	2,02
3	4,90	0,74	3,98	0,80	4,47	0,89
4	5,08	0,89	4,26	0,87	4,70	0,97
5	5,76	0,84	4,79	0,89	5,31	0,99
6	5,91	0,86	5,12	0,82	5,54	0,93
7	6,73	0,99	6,04	1,02	6,41	1,06

**Tab. 21:** Mittelwert der Pedikelbreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	4,42	1,75	3,53	1,70	4,01	1,78
3	2,21	1,05	1,35	0,95	1,81	1,09
4	2,25	1,15	1,46	0,95	1,88	1,13
5	2,69	1,27	1,58	1,18	2,17	1,34
6	3,06	1,25	2,11	1,21	2,62	1,32
7	4,33	1,09	3,55	1,20	3,97	1,21

**Tab. 22:** Mittelwert der Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	10,48	1,22	9,59	1,48	10,07	1,42
3	7,06	1,01	5,97	0,82	6,55	1,08
4	7,30	1,18	6,13	0,95	6,76	1,22
5	6,78	1,07	5,65	0,85	6,25	1,12
6	6,48	1,19	5,38	0,99	5,97	1,23
7	7,19	1,15	6,02	0,77	6,65	1,15

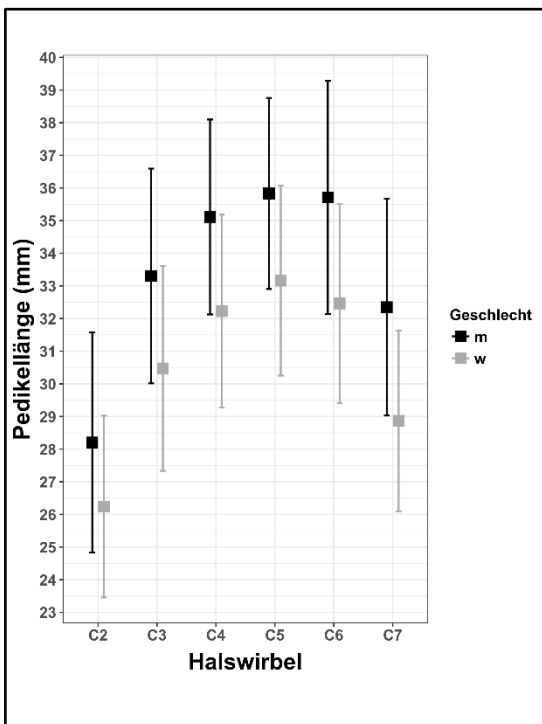
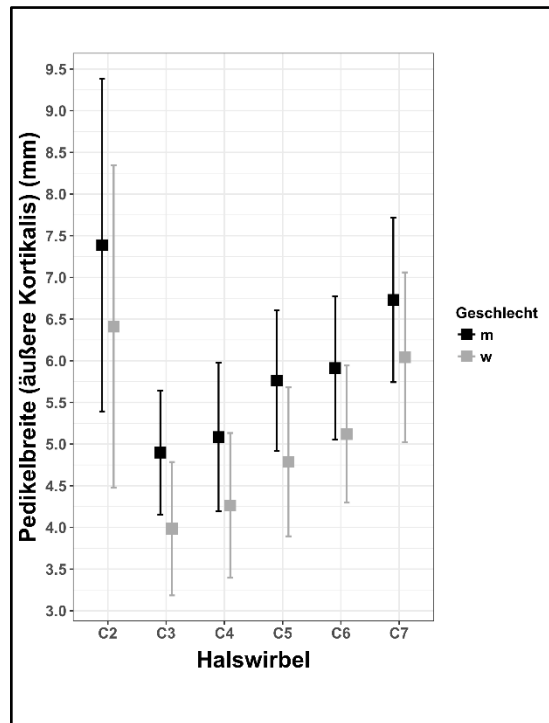


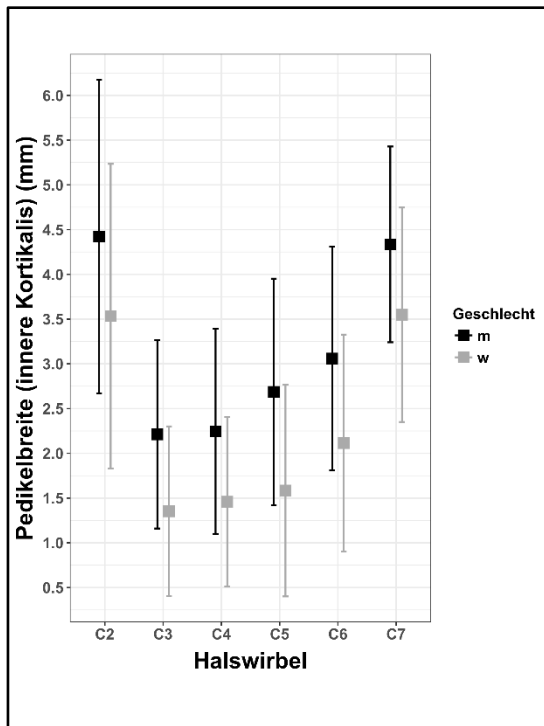
**Tab. 23:** Mittelwert der Pedikelhöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	6,53	1,78	5,77	1,97	6,18	1,91
3	2,85	1,17	2,12	1,30	2,51	1,28
4	2,86	1,17	2,01	1,18	2,47	1,25
5	2,73	1,16	1,82	1,22	2,31	1,27
6	2,93	1,14	2,08	1,03	2,53	1,16
7	3,90	1,06	3,15	0,96	3,55	1,08

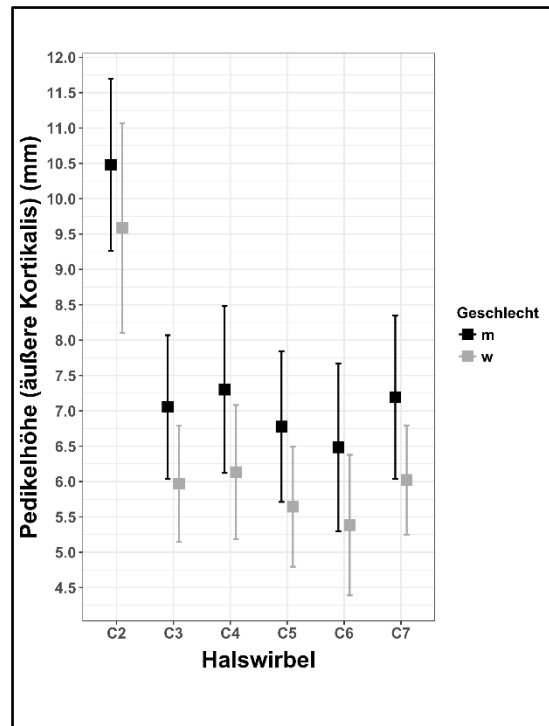
**Tab. 24:** Mittelwert der Pedikelwinkel mit Standardabweichung in Grad

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	33	8,39	32	7,13	32	7,85
3	48	5,40	47	4,54	48	5,05
4	52	5,52	50	5,29	51	5,43
5	50	5,41	49	6,86	49	6,13
6	44	6,05	43	6,08	44	6,07
7	34	6,30	33	5,71	34	6,05

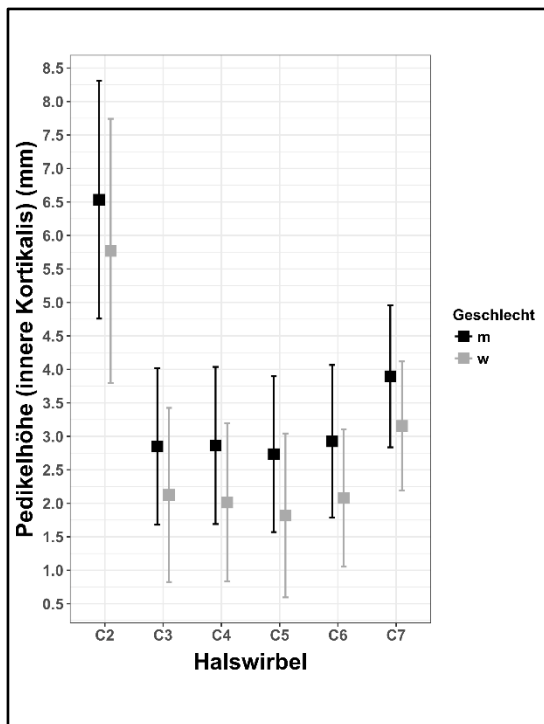
**Abb. 75:** Mittelwert der Pedikellänge mit Standardabweichungen, C2-C7**Abb. 76:** Mittelwert der Pedikelbreite mit Standardabweichungen (äußere Kortikalis), C2-C7



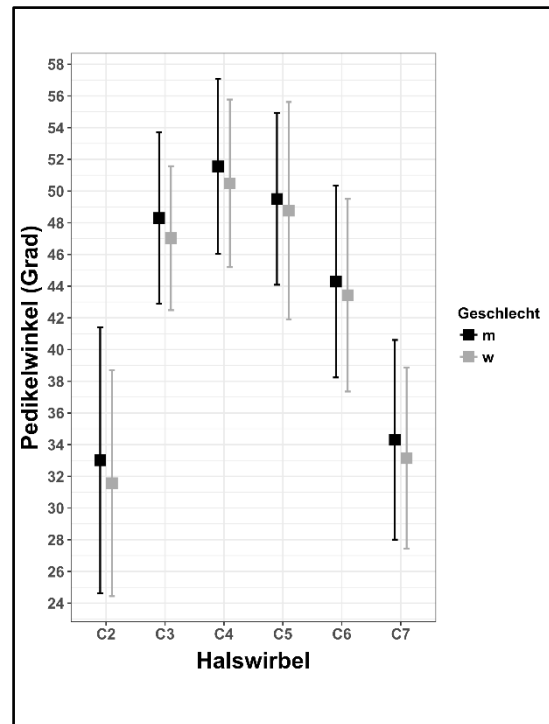
**Abb. 77:** Mittelwert der Pedikelbreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



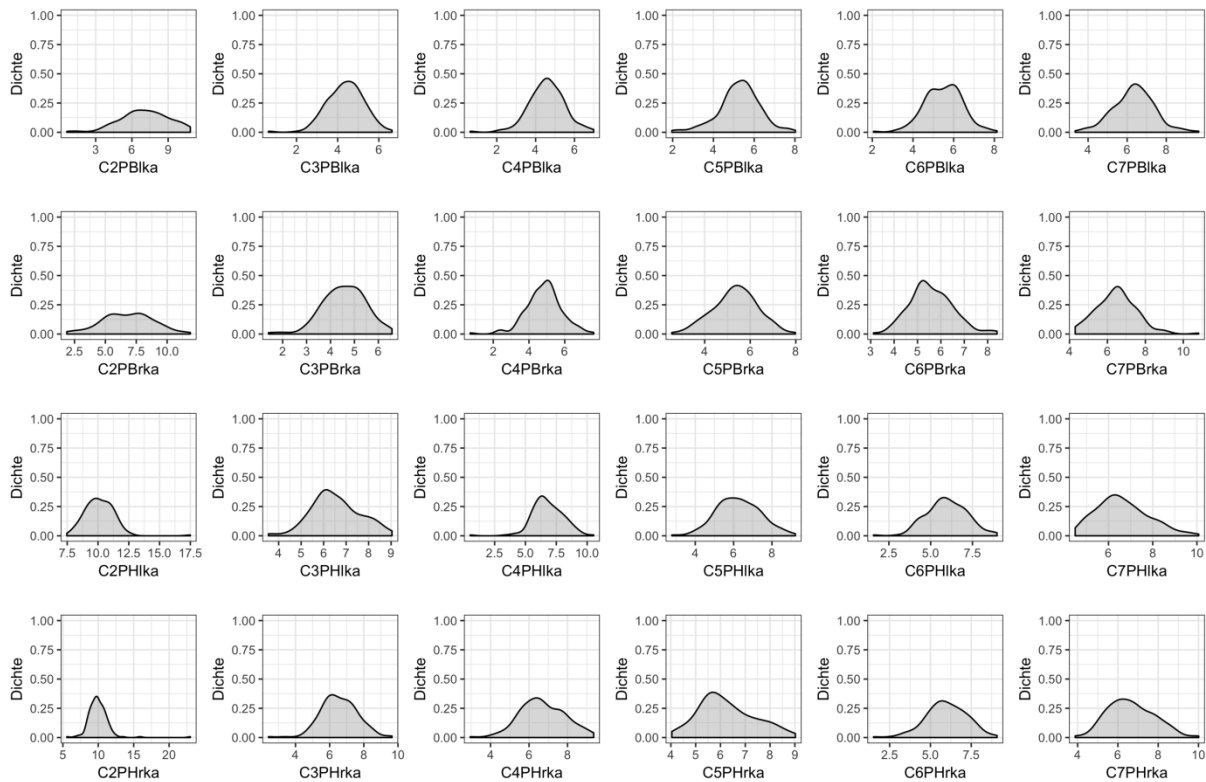
**Abb. 78:** Mittelwert der Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



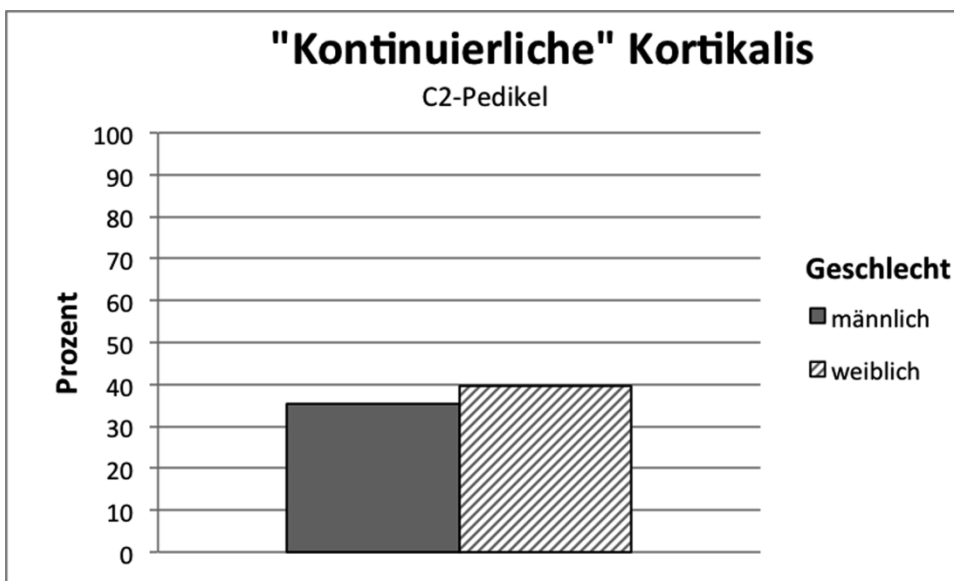
**Abb. 79:** Mittelwert der Pedikelhöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 80:** Mittelwert der Pedikelwinkel mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 81:** Häufigkeitsverteilung der Pedikelbreiten und -höhen (äußere Kortikalis) C2 bis C7 im Seitenvergleich  
X-Achse in mm, Parameterabkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis



**Abb. 82:** Prozentualer Anteil der C2-Pedikel mit „kontinuierlicher“ Kortikalis

### 3.4.7 Massa lateralis Parameter

Wie bei den meisten Parametern, weist die männliche Patientengruppe bei den ermittelten Massa lateralis Parametern höhere Mittelwerte auf als das weibliche Kollektiv (Tabellen 25-29, Abbildungen 83-87).

Die durchschnittliche Kreisfläche nimmt im Gesamtkollektiv von C2 (66 mm<sup>2</sup>) nach kaudal bis C7 (133 mm<sup>2</sup>) zu. Die durchschnittlichen sagittalen Durchmesser sind auf Höhe des zweiten Wirbels besonders groß (23,28 mm). Die Mittelwerte der anderen betrachteten Halswirbel liegen zwischen dem Minimum bei C3 (14,38 mm) und dem Maximum bei C7 (16,85 mm), wobei ein kontinuierlicher Anstieg von C3 nach kaudal zu verzeichnen ist.

Auch die schrägen Massa lateralis Durchmesser weisen den bei den sagittalen Durchmessern beschriebenen Verlauf auf. So liegt das Maximum der Mittelwerte bei C2 (20,94 mm). Der geringste Wert ist auf Höhe von C3 (15,05 mm) zu verzeichnen. Der Anstieg der Mittelwerte bis C7 (20,22 mm) erfolgt relativ gleichmäßig.

Im Vergleich zu den sagittalen und schrägen Durchmessern zeigen die transversalen Durchmesser deutlich niedrigere Mittelwerte. Das Minimum liegt bei den transversalen Durchmessern auf Höhe des zweiten Halswirbels (9,18 mm). Nach kaudal erfolgt ein Anstieg der Werte bis zum Maximum bei C7 (14,06 mm).

Bei Betrachtung der ermittelten Massa lateralis Höhe fällt eine kontinuierliche Abnahme der Mittelwerte von C2 (11,47 mm) nach C7 (6,50 mm) auf.

**Tab. 25:** Mittelwert der Massa lateralis Fläche mit Standardabweichung in mm<sup>2</sup>

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	72	20,53	59	16,04	66	19,60
3	113	29,67	95	21,35	104	27,62
4	115	24,17	99	25,23	108	25,94
5	129	26,79	108	24,92	120	27,97
6	129	29,14	110	26,09	120	29,28
7	143	39,43	122	30,38	133	36,94

**Tab. 26:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	23,71	4,32	22,79	3,99	23,28	4,19
3	14,79	1,98	13,89	1,69	14,38	1,90
4	15,01	2,19	14,10	2,03	14,59	2,16
5	15,27	2,23	14,01	2,13	14,69	2,27
6	15,66	2,59	14,86	2,54	15,29	2,60
7	17,60	3,07	16,00	2,46	16,85	2,91

**Tab. 27:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

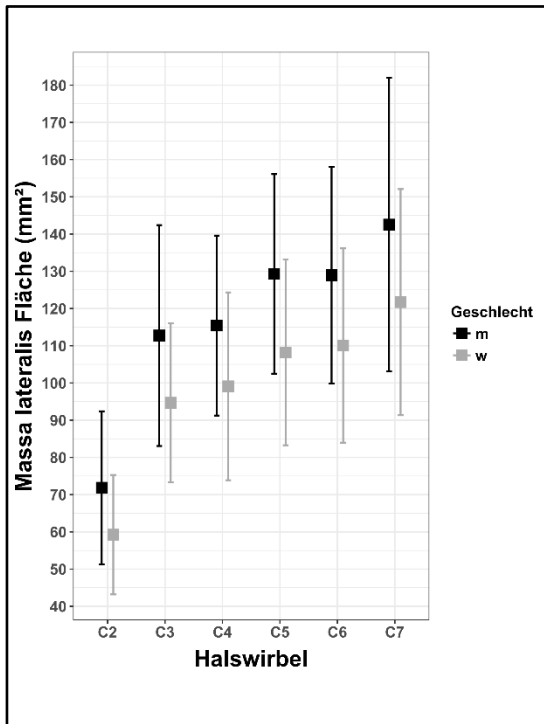
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	9,59	1,59	8,70	1,25	9,18	1,51
3	12,13	1,79	11,04	1,29	11,62	1,67
4	12,57	1,53	11,49	1,70	12,07	1,70
5	13,80	1,58	12,60	1,66	13,25	1,73
6	13,83	1,76	12,64	1,60	13,28	1,79
7	14,47	2,20	13,60	2,39	14,06	2,33

**Tab. 28:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) mit Standardabweichung in mm

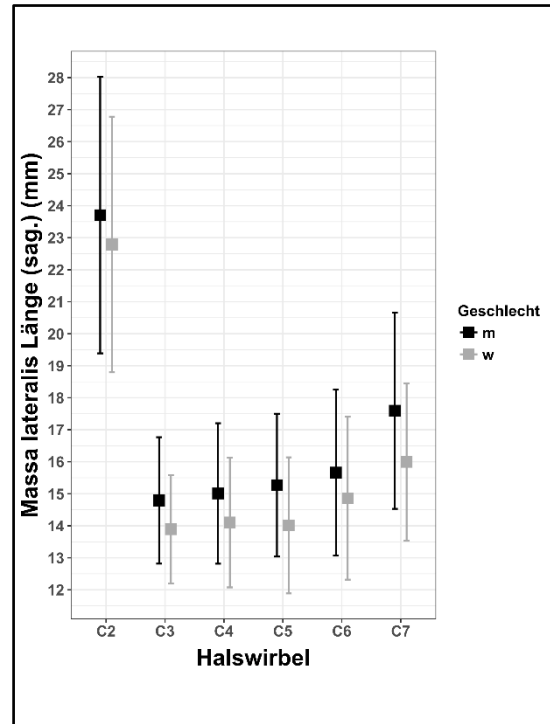
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	21,59	3,96	20,18	3,69	20,94	3,89
3	15,43	1,84	14,61	1,71	15,05	1,82
4	16,31	2,16	15,59	2,27	15,97	2,24
5	17,10	2,19	15,86	2,39	16,53	2,36
6	19,55	2,78	18,60	2,93	19,11	2,89
7	21,09	4,14	19,22	3,76	20,22	4,07

**Tab. 29:** Mittelwert der Massa lateralis Höhe mit Standardabweichung in mm

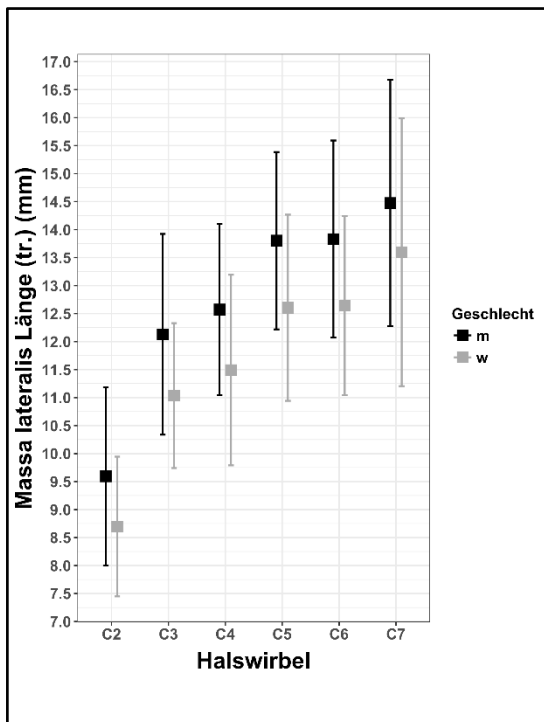
Halswirbel	männlich		weiblich		Gesamt	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
2	11,70	1,97	11,20	3,18	11,47	2,61
3	10,27	2,53	9,68	2,52	10,00	2,54
4	9,20	1,68	8,52	1,40	8,88	1,59
5	9,27	1,61	8,29	1,37	8,82	1,58
6	7,94	1,50	6,78	1,17	7,40	1,48
7	6,78	1,31	6,18	1,58	6,50	1,47



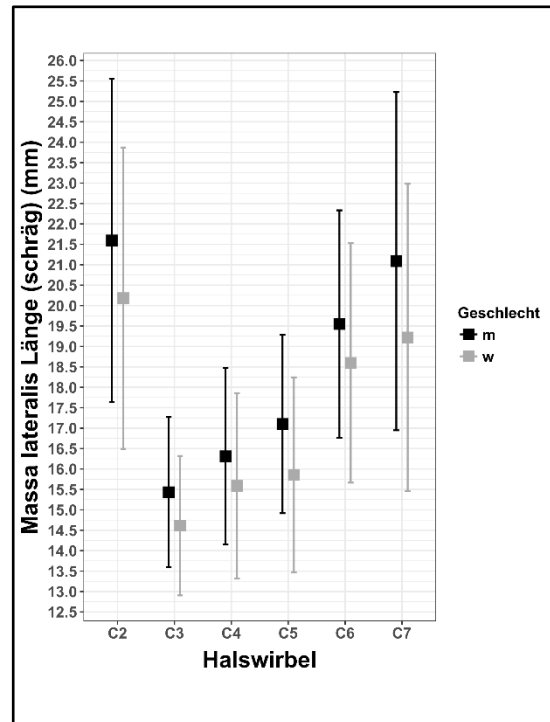
**Abb. 83:** Mittelwert der Massa lateralis Fläche mit Standardabweichungen, C2-C7



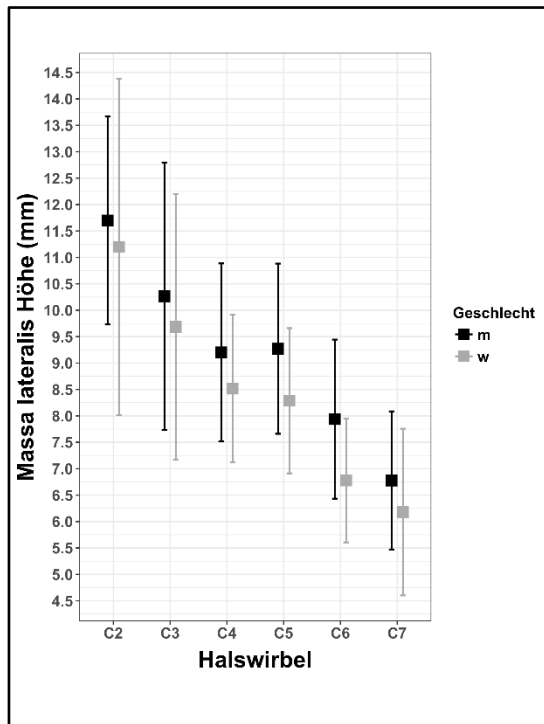
**Abb. 84:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 85:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichungen, C2-C7



**Abb. 86:** Mittelwert der Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) mit Standardabweichungen, C2-C7

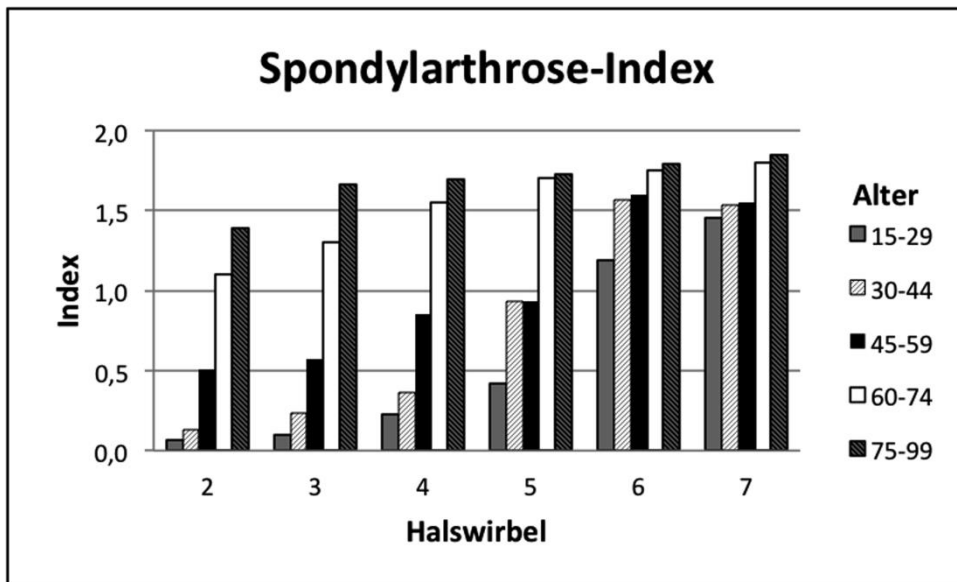


**Abb. 87:** Mittelwert der Massa lateralis Höhe mit Standardabweichungen, C2-C7

### 3.5 Degeneration der Halswirbelsäule

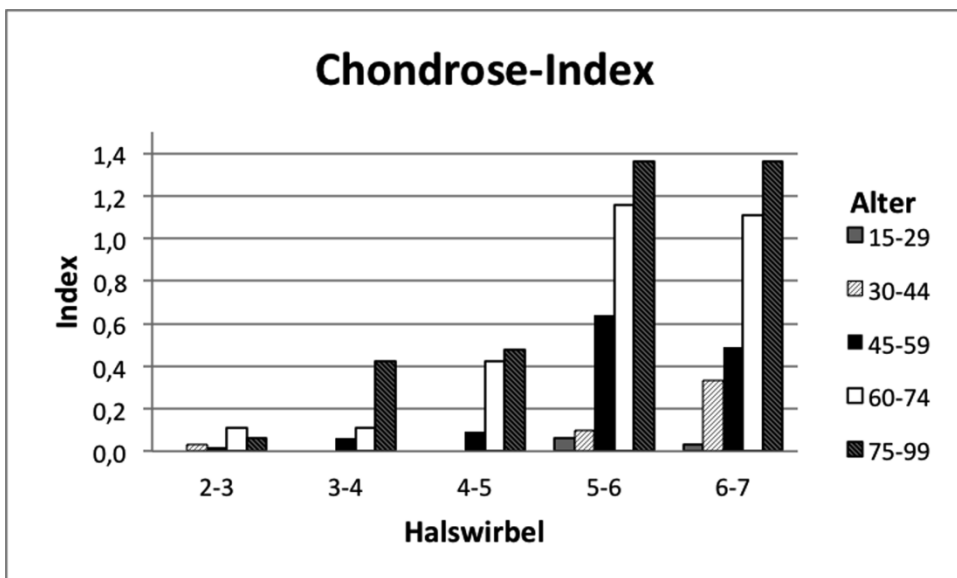
Zur Quantifizierung der Degenerationseffekte im Bereich der knöchernen Halswirbelsäule werden fünf Parameter untersucht. In Anlehnung an definierte Klassifizierungen werden Indices für das Vorliegen einer Spondylarthrose, Sklerose, Chondrose, Spondylose und Retrospondylose der Wirbel erstellt.

Es ist eine Zunahme der Spondylarthrose mit steigendem Alter zu verzeichnen (Abbildung 88). Zudem wird eine Progredienz der Ausprägung von kranial nach kaudal deutlich.



**Abb. 88:** Spondylarthrose-Index, C2-C7

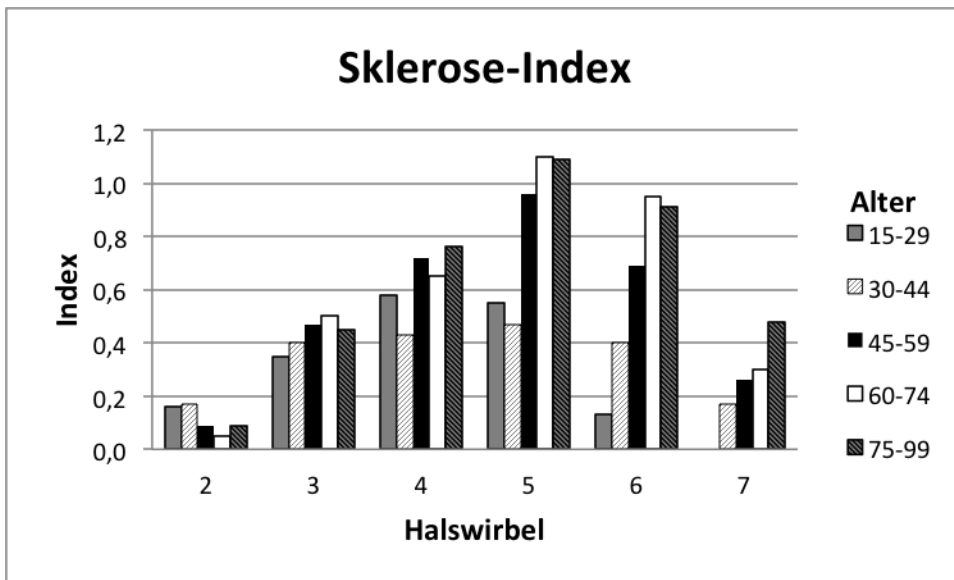
Der Chondrose-Index weist geringe Werte in den Wirbelsäulenabschnitten C2/3 bis C4/5 auf (Abbildung 89). Bei C5/6 befindet sich die maximale Chondrose-Ausprägung. Auf Höhe C6/7 fällt der Index ebenfalls hoch aus, weist jedoch in den meisten Altersklassen einen leicht geringeren Wert auf als bei C5/6. Ab 45 Jahren und besonders ab 60 Jahren steigen der Index und somit die Chondrose-Inzidenz deutlich an.



**Abb. 89:** Chondrose-Index, C2-C7

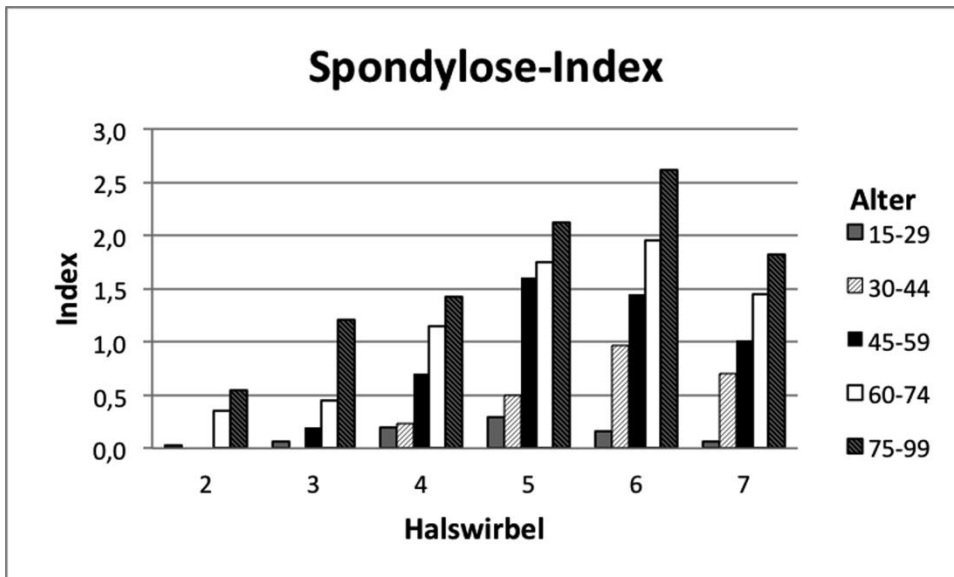


Im Bereich des 5. Halswirbelkörpers ist der Sklerose-Index in den meisten Altersgruppen am höchsten (Abbildung 90). Bei den über 45-Jährigen ist bei C5 und C6 im Vergleich zur jüngeren Population ein deutlich höherer Index zu verzeichnen. Der C2-Wirbelkörper ist von den betrachteten Halswirbeln am geringsten betroffen. Dieser Wirbelkörper weist zudem die geringsten Indexunterschiede in den analysierten Altersgruppen auf.



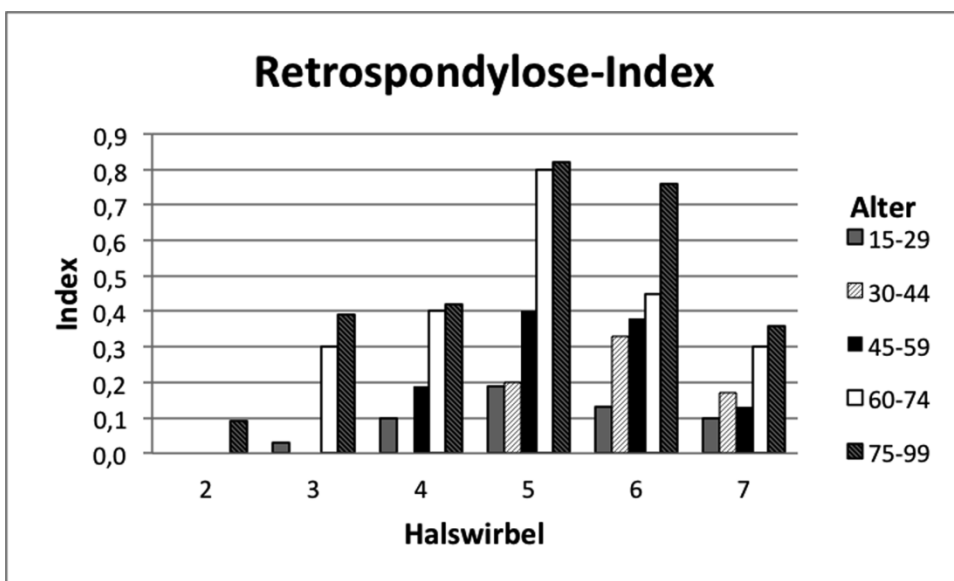
**Abb. 90:** Sklerose-Index, C2-C7

Bei Betrachtung des Spondylose-Indexes wird eine Zunahme der Ausprägung mit steigendem Alter deutlich (Abbildung 91). Die kaudalen Wirbel C5, C6 und C7 sind besonders stark von Osteophytenbildung betroffen, wobei bei C6 die maximale Ausprägung vorliegt.



**Abb. 91:** Spondylose-Index, C2-C7

Der Retrospondylose-Index besitzt ein Maximum bei C5 (Abbildung 92). Der 6. Halswirbel ist ebenfalls relativ stark von einer Retrospondylosebildung betroffen. Auch hier zeigt sich mit wenigen Ausnahmen eine Progredienz im Alter, wobei besonders bei den Wirbelsäulenabschnitten C5 bis C7 bereits bei jungen Patienten leichte degenerative Effekte im Sinne einer Retrospondylose zu verzeichnen sind.



**Abb. 92:** Retrospondylose-Index, C2-C7

Insgesamt sind besonders die kaudalen Halswirbel C5 bis C7 von degenerativen Effekten betroffen. Bei Berücksichtigung aller erhobenen Indices lässt sich erwartungsgemäß eine Zunahme der Verschleißerscheinungen im Alter feststellen. Eine Spondylarthrose im Bereich der unteren HWS betrifft nicht selten auch schon jüngere Personen.

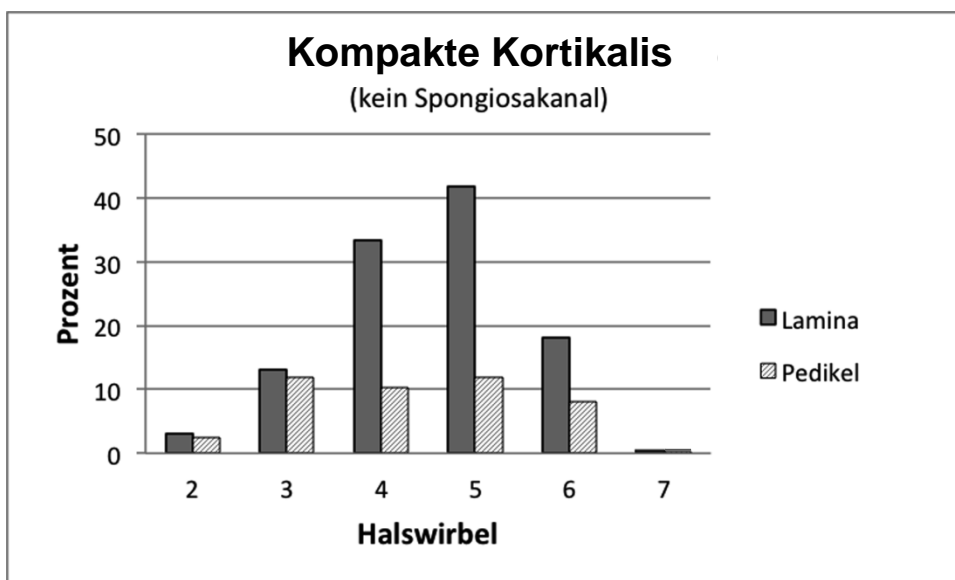
### 3.6 Durchgängig kortikaler Aufbau

Die Messparameter „Lamina Breite (innere Kortikalis)“ und „Pedikel Breite (innere Kortikalis)“ werden in den Messablauf eingeschlossen um zu bestimmen, wie groß der prozentuale Anteil der Patienten ist, die eine kompakte Kortikalis besitzen. Diese kompakte Kortikalis beschreibt eine kortikale Durchbauung am Isthmus der jeweiligen Struktur auf der betrachteten Transversalebene, sodass ein durchgängiger kortikaler Knochen ohne Spongiosakanal vorliegt (Distanz der inneren Kortikalisgrenzen gleich Null).

Es wird deutlich, dass die Lamina der Wirbel C2 bis C6 häufiger kortikal durchbaut ist als der Pedikel desselben Wirbelsäulenabschnittes (Tabelle 30, Abbildung 93). Beim siebten Halswirbel befindet sich sowohl bei der Betrachtung der Pedikel als auch bei Beurteilung der Laminabreite die geringste Durchbauungsrate von 0,31 %. Auch auf Höhe des zweiten Halswirbels liegt nur bei einem geringen prozentualen Anteil von 3,11 % (Lamina) und 2,49 % (Pedikel) eine solide kortikale Struktur vor. In den dazwischen liegenden Wirbelsäulenabschnitten zeigt sich eine stärkere Durchbauung. Bei den Pedikeln liegen die Durchbauungsraten der Wirbel C3 bis C6 zwischen 8,07 % und 11,80 %. Bei Analyse der Laminabreite fällt ein Peak der Anzahl der soliden kortikalen Laminae auf Höhe des fünften Halswirbels mit 41,82 % auf. Die Werte der Wirbel C3, C4 und C6 liegen zwischen 13,08 % (C3) und 33,44 % (C4).

**Tab. 30:** Prozentualer Anteil der Laminae und Pedikel mit kompakter Kortikalis ohne Spongiosakanal

Halswirbel	Lamina	Pedikel
2	3,11	2,49
3	13,08	11,80
4	33,44	10,25
5	41,82	11,95
6	18,07	8,07
7	0,31	0,31



**Abb. 93:** Prozentualer Anteil der Laminae und Pedikel mit kompakter Kortikalis ohne Spongiosakanal, C2-C7

### 3.7 Platzierbarkeit von Lamina- und Pedikelschrauben

Für die Lamina- und Pedikelchirurgie werden unter anderem Schrauben in einem Durchmesser von 3,5 mm und 4,0 mm angeboten. Anhand der vorliegenden CT-Bilder werden diese Schrauben auf eine Realisierbarkeit der Einbringung untersucht. Als Ausschlusskriterium wird eine Lamina- oder Pedikelbreite und -höhe am jeweiligen Isthmus  $\leq 5,5$  mm für die 3,5 mm Schraube bzw.  $\leq 6,0$  mm für die 4,0 mm Schraube festgelegt. Da die präzise Schraubeneinbringung technisch schwierig ist, wird eine zusätzliche Sicherheitstoleranz über dem Schraubendurchmesser definiert. Unter Berücksichtigung klinischer Erfahrungswerte aus der hiesigen Klinik (Instrumentarium, Schraubengeometrie, praktische Anwendung) wurde der Wert für die Sicherheitstoleranz für die folgenden Betrachtungen auf 2 mm festgelegt. Unter größter Vorsicht kann es ggf. auch möglich sein, eine 3,5 mm Schraube in eine Struktur mit Breiten- und Höhendurchmessern  $> 3,5$  mm und eine 4,0 mm Schraube in eine Struktur mit Durchmessern  $> 4,0$  mm einzubringen, selbst wenn die Sicherheitstoleranz von 2 mm nicht gegeben ist. Diese Möglichkeiten der Schraubeneinbringung werden im Folgenden näher betrachtet.

### 3.7.1 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Unter Berücksichtigung einer 2 mm Toleranz können 3,5 mm Pedikelschrauben bei 75,08 % der betrachteten C2-Pedikel eingebracht werden (Tabelle 31). Auf Höhe des siebten Halswirbels sind bei 70,19 % der C7-Pedikel Schraubenplatzierungen möglich. Die mittleren Halswirbel C3 bis C6 besitzen kleinere Pedikeldurchmesser, sodass in deutlich weniger Fällen eine Schraube platziert werden kann. Die ermittelten prozentualen Anteile der Messwerte über 5,5 mm liegen beim Gesamtkollektiv zwischen 11,49 % und 38,82 %. Der C3-Pedikel bietet in den seltensten Fällen eine Möglichkeit der Schraubeneinbringung (11,49 %).

Die Platzierung der Pedikelschrauben ist bei Männern häufiger möglich als bei Frauen (Tabelle 31, Abbildungen 106-107 im Anhang). Eine C2-Pedikelschraube kann unter den genannten Kriterien beispielsweise bei 81,98 % der Pedikel des männlichen Patientenkollektivs und bei 67,11 % der Pedikel der weiblichen Patientengruppe eingebracht werden.

Auch bei Betrachtung der verschiedenen Altersgruppen sind stets beim männlichen Patientenkollektiv häufiger Schrauben platzierbar (Tabelle 32). Bei den Gruppen zwischen 17 und 29 Jahren bzw. 45 und 59 Jahren fallen größere Geschlechtsunterschiede bezüglich der Möglichkeit einer C2-Schraubenplatzierung auf (17-29 Jahre: 18,10 Prozentpunkte Differenz, 45-59 Jahre: 27,69 Prozentpunkte Differenz). In den anderen Altersgruppen liegen die Geschlechtsunterschiede zwischen 0,81 % und 11,62 %.

Bezüglich der Durchführbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube bestehen beim Gesamtkollektiv in den verschiedenen Altersgruppen nur geringe Unterschiede (Tabelle 33, Abbildungen 94-95). Bei fast allen Wirbelhöhen (Ausnahme C4) würden die Pedikel der über 75-Jährigen die wenigsten Schraubeneinbringungen erlauben. Die Raten der möglichen Einbringungen einer C2-Pedikelschraube liegen bei Patienten zwischen 17 und 74 Jahren zwischen 73,4 % und 82,5 %. Bei über 75-Jährigen Patienten würde aufgrund leicht geringerer Pedikeldurchmesser in 66,67 % eine C2-Pedikelschraube Platz finden.

Wie bereits erwähnt, kann unter größter Vorsicht eine Schraubenplatzierung auch bei Pedikeldurchmessern unter 5,5 mm gelingen, wenn die Struktur am Isthmus eine Höhe und Breite von über 3,5 mm aufweist. Dies würde die Rate der möglichen Schraubeneinbringungen anheben, beim C2-Pedikel beispielsweise auf 96,26 %, beim C7-Pedikel auf 99,69 % und beim C3-Pedikel auf 85,40 % (Tabelle 31).

Wird unter Nichtbetrachtung der Pedikelhöhe allein die Pedikelbreite als Voraussetzung für die Machbarkeit einer Schraubeneinbringung festgelegt, steigt der Anteil der Wirbel, der für eine Verschraubung geeignet ist, im Bereich der Wirbel C3 bis C7 (Tabelle 34). Der prozentuale Anteil der operationstauglichen Pedikel würde bei einer 3,5 mm Schraube mit Berücksichtigung der 2 mm Sicherheitstoleranz um bis zu 11,49 Prozentpunkte (C6) steigen, im Bereich des zweiten Halswirbels würde keine Veränderung der Rate eintreten.

**Tab. 31:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Halswirbel	mit 2 mm Sicherheitstoleranz			ohne 2 mm Sicherheitstoleranz		
	Gesamt	männlich	weiblich	Gesamt	männlich	weiblich
2	75,08	81,98	67,11	96,26	98,26	93,96
3	11,49	19,77	2,00	85,40	94,19	75,33
4	16,15	26,16	4,67	90,68	96,51	84,00
5	32,08	52,35	8,78	95,91	100,00	91,22
6	38,82	58,72	16,00	96,58	97,67	95,33
7	70,19	84,88	53,33	99,69	100,00	99,33

**Tab. 32:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen

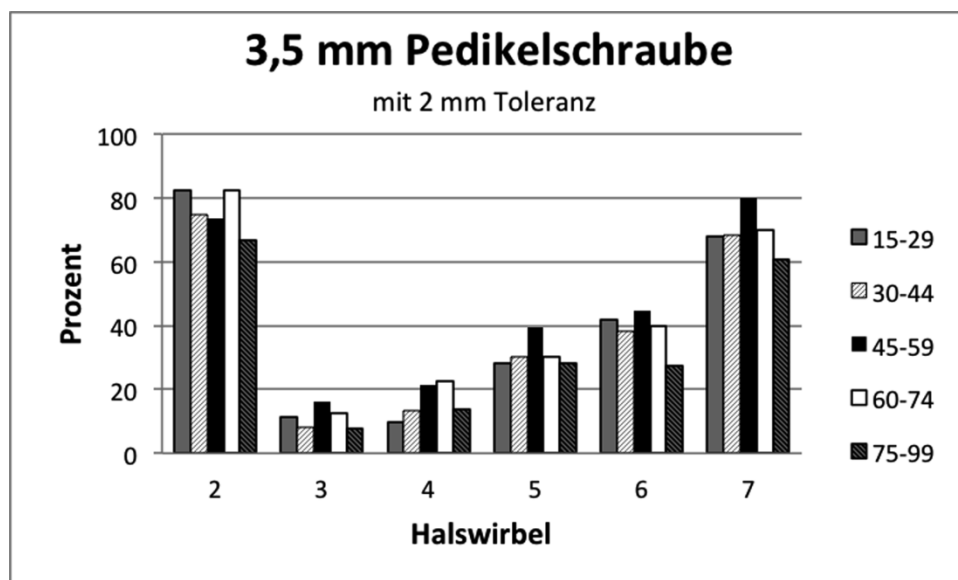
Halswirbel	Alter									
	männlich					weiblich				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	88,10	75,00	85,19	88,89	70,00	70,00	74,19	57,50	77,27	63,89
3	16,67	17,86	25,93	22,22	13,33	0,00	0,00	2,50	4,55	2,78
4	14,29	28,57	31,48	33,33	26,67	0,00	0,00	7,50	13,64	2,78
5	37,50	57,14	59,26	61,11	50,00	10,00	6,25	12,50	4,55	8,82
6	47,62	60,71	66,67	77,78	46,67	30,00	18,75	15,00	9,09	11,11
7	80,95	92,86	92,59	83,33	70,00	40,00	46,88	62,50	59,09	52,78

**Tab. 33:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen

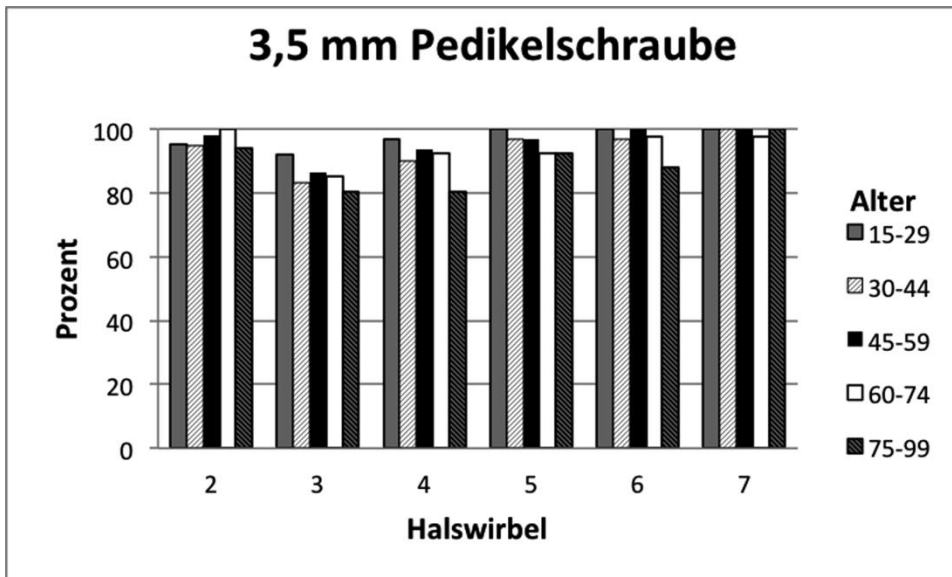
Halswirbel	Alter				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	82,26	74,58	73,40	82,50	66,67
3	11,29	8,33	15,96	12,50	7,58
4	9,68	13,33	21,28	22,50	13,64
5	28,33	30,00	39,36	30,00	28,12
6	41,94	38,33	44,68	40,00	27,27
7	67,74	68,33	79,79	70,00	60,61

**Tab. 34:** Prozentualer Anteil der platzierbaren Pedikelschrauben aufgrund einer ausreichenden Breite ohne Berücksichtigung der Höhe mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Halswirbel	3,5 mm Schraube		4,0 mm Schraube	
	ohne Toleranz	mit Toleranz	ohne Toleranz	mit Toleranz
2	96,26	75,08	93,15	66,36
3	86,02	11,80	71,74	3,73
4	90,99	17,39	79,19	8,07
5	96,23	42,14	90,25	22,96
6	98,76	50,31	95,96	31,99
7	99,69	80,43	98,76	67,39



**Abb. 94:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

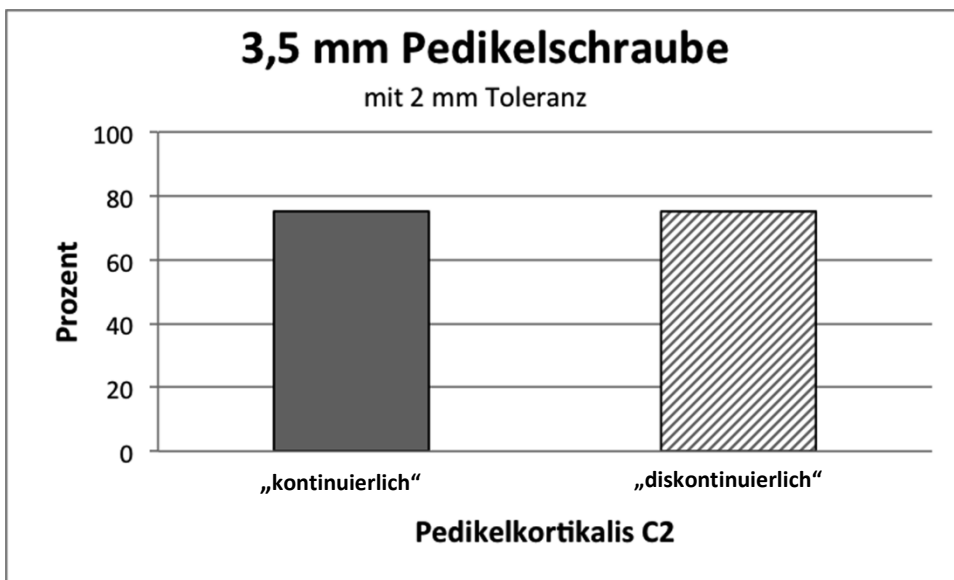


**Abb. 95:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

### 3.7.2 „Kontinuierliche“ C2-Pedikelkortikalis: Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Es wird untersucht, ob die Klassifizierung der Pedikelkortikalis einen Effekt auf die Möglichkeit der Platzierung einer 3,5 mm C2-Pedikelschraube hat. Dabei wird ein Pedikel als operationsgeeignet eingestuft, wenn die Durchmesser von Höhe und Breite über 5,5 mm liegen. Eine „kontinuierliche“ Kortikalis ohne Unterbrechungen oder Kontrastminderung liegt bei 37,38 % der vermessenen Pedikel vor. Diese Pedikel mit „kontinuierlicher“ Kortikalis bieten in 75 % eine ausreichende Höhe und Breite für eine Einbringung der Schraube (Abbildung 96). Die untersuchten Pedikel mit einer „diskontinuierlichen“ Kortikalis erfüllen in 75,12 % die hier genannten anatomischen Voraussetzungen für eine Pedikelschraube.





**Abb. 96:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei „kontinuierlicher“ und „diskontinuierlicher“ Pedikelkortikalis

### 3.7.3 Platzierbarkeit einer 4,0 mm Pedikelschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Das Einbringen einer 4,0 mm Pedikelschraube bei Pedikeldurchmessern über 6,0 mm ist analog zur 3,5 mm Schraube hauptsächlich auf Höhe des zweiten (66,36 %) und siebten Halswirbels (52,17 %) möglich (Tabelle 35). Erwartungsgemäß lässt sich die 4,0 mm Schraube an der HWS seltener einbringen als das kleinere Modell. Der Pedikel des 3. Halswirbels erfüllt auch bei diesem Schraubendurchmesser im Vergleich zu den anderen HWS-Abschnitten am wenigsten die anatomischen Voraussetzungen für eine Schraube; eine Schraube passt nur bei 3,73 % der untersuchten Pedikel.

Bei diesem Schraubendurchmesser sind ebenfalls bei männlichen Patienten häufiger die anatomischen Voraussetzungen für eine Osteosynthese gegeben als bei dem weiblichen Patientenkollektiv. Vergleichbar zur obigen Auswertung sind auch die Machbarkeitsraten der verschiedenen Altersgruppen bei der 4,0 mm Schraube untereinander ähnlich (Tabellen 36-37, Abbildungen 97-98).

Wird die Sicherheitstoleranz von 2 mm nicht gefordert, ist bei 70,81 % (C3) bis 98,45 % (C7) die Osteosynthese mit einer 4,0 mm Pedikelschraube im Rahmen der hier betrachteten Kriterien möglich.

Wird ausschließlich die Pedikelbreite und nicht die Pedikelhöhe in die Planung einer Schraubeneinbringung einbezogen, führt dies bei den C4- bis C7-Pedikeln zu einer Zunahme der potenziell möglichen Platzierungen (Tabelle 34). Der prozentuale Anteil der operationstauglichen Pedikel würde bei einer 4,0 mm Schraube mit Berücksichtigung der 2 mm Sicherheitstoleranz um bis zu 15,22 Prozentpunkte (C7) steigen, im Bereich des zweiten und dritten Halswirbels würde keine Veränderung der Rate eintreten.

**Tab. 35:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

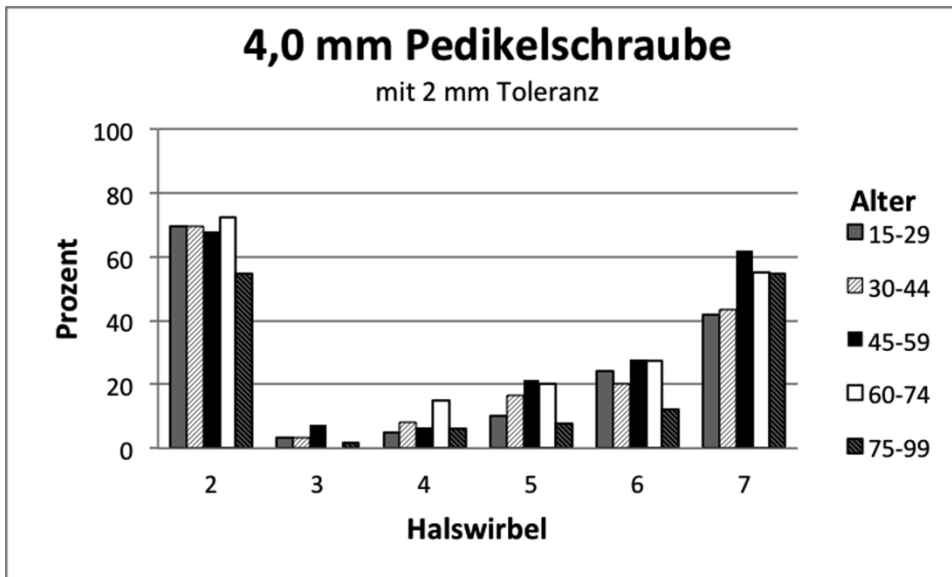
Halswirbel	mit 2 mm Sicherheitstoleranz			ohne 2 mm Sicherheitstoleranz		
	Gesamt	männlich	weiblich	Gesamt	männlich	weiblich
2	66,36	72,67	59,06	93,15	95,93	89,93
3	3,73	6,98	0,00	70,81	88,37	50,67
4	7,45	12,21	2,00	78,88	91,28	64,67
5	15,41	27,65	1,35	89,94	98,24	80,41
6	22,36	36,63	6,00	92,24	97,09	86,67
7	52,17	68,60	33,33	98,45	99,42	97,33

**Tab. 36:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen

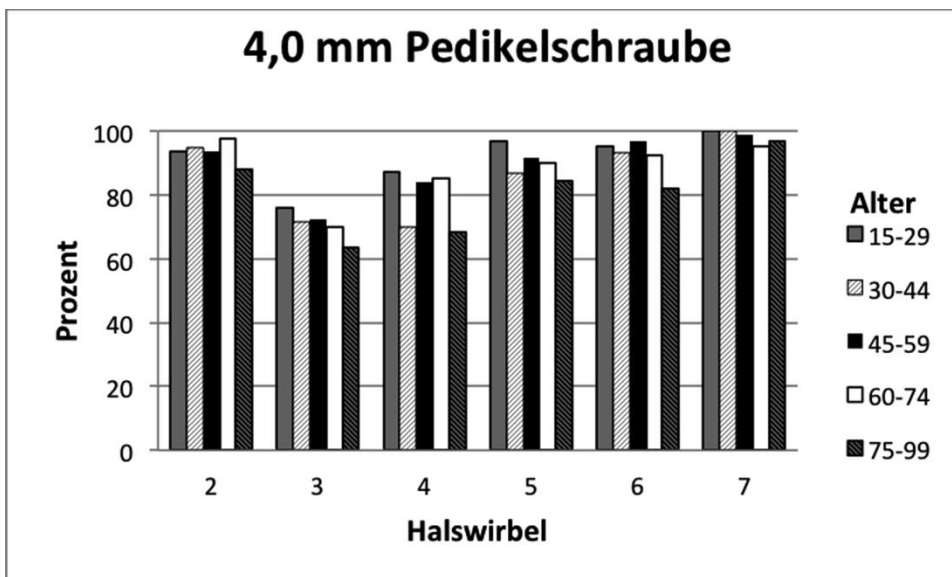
Halswirbel	Alter				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	69,35	69,49	68,09	72,50	54,55
3	3,23	3,33	7,45	0,00	1,52
4	4,84	8,33	6,38	15,00	6,06
5	10,00	16,67	21,28	20,00	7,81
6	24,19	20,00	27,66	27,50	12,12
7	41,94	43,33	61,70	55,00	54,55

**Tab. 37:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen

Halswirbel	Alter									
	männlich					weiblich				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	73,81	64,29	79,63	83,33	60,00	60,00	74,19	52,50	63,64	50,00
3	4,76	7,14	12,96	0,00	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	7,14	17,86	9,26	22,22	13,33	0,00	0,00	2,50	9,09	0,00
5	15,00	35,71	35,19	38,89	16,67	0,00	0,00	2,50	4,55	0,00
6	26,19	39,29	42,59	61,11	23,33	20,00	3,12	7,50	0,00	2,78
7	54,76	71,43	75,93	83,33	63,33	15,00	18,75	42,50	31,82	47,22



**Abb. 97:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7



**Abb. 98:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

### 3.7.4 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Wie bereits im Kapitel „Ergebnisse Laminaparameter“ erwähnt, sind die Laminae der HWS durch geringere Breiten gekennzeichnet als vergleichbare Pedikel. Dadurch sind sie

im Durchschnitt seltener für eine Instrumentierung geeignet als die Pedikel desselben Wirbels.

Laminaschrauben mit eingerechneter 2 mm Sicherheitstoleranz sind ausschließlich bei der C2- und der C7-Lamina möglich. Auf Höhe des zweiten Halswirbels passen die 3,5 mm Schrauben aufgrund der anatomischen Gegebenheiten in 53,11 %, bei C7 in 12,42 % der Fälle (Tabelle 38).

Anders als bei den Pedikelschrauben ist die Einbringung einer Laminaschraube nicht auf allen Wirbelhöhen häufiger bei männlichen Patienten möglich. Die C2-Laminaschraube kann bei den weiblichen Patienten minimal häufiger platziert werden (Tabelle 38, Abbildungen 108-109 im Anhang). Bei Betrachtung der verschiedenen Altersgruppen sind ebenfalls nicht immer mehr männliche Patienten instrumentierbar. In den Altersgruppen 17-29 Jahre, 45-59 Jahre und 75-99 Jahre ist bei Frauen der prozentuale Anteil der möglichen Laminaschrauben höher (Tabelle 40).

Die Unterschiede bezüglich der Durchführbarkeit einer Laminaschraube in den verschiedenen Altersgruppen sind gering (Tabellen 39-40, Abbildungen 99-100).

Bei Verzicht auf die Sicherheitstoleranz können, wie bei den Pedikelschrauben, auch in die Lamina potenziell häufiger Schrauben eingebracht werden (Tabelle 38). Der Anteil steigt beim Gesamtkollektiv um bis zu ca. 71 Prozentpunkte.

Wird ausschließlich die Laminabreite als Kriterium für eine Schraubenanlage festgelegt, zeigt sich kein Unterschied zu den ermittelten prozentualen Anteilen der machbaren Laminaschrauben aufgrund von Höhe und Breite (Tabelle 41). Wird jedoch nur die Höhe als Kriterium gesetzt und die Breite außen vorgelassen, lässt sich in 99 % bis 100 % der Fälle eine Schraube einsetzen (Tabelle 42).

**Tab. 38:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Halswirbel	mit 2 mm Sicherheitstoleranz			ohne 2 mm Sicherheitstoleranz		
	Gesamt	männlich	weiblich	Gesamt	männlich	weiblich
2	53,11	52,91	53,33	93,79	91,28	96,67
3	0,00	0,00	0,00	29,28	32,56	25,50
4	0,00	0,00	0,00	5,00	6,98	2,70
5	0,00	0,00	0,00	2,20	3,53	0,68
6	0,00	0,00	0,00	10,28	15,70	4,03
7	12,42	12,79	12,00	83,23	87,21	78,67

**Tab. 39:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen

Halswirbel	Alter				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	50,00	55,00	60,64	52,50	43,94
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	4,84	18,33	9,57	22,50	12,12

**Tab. 40:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen

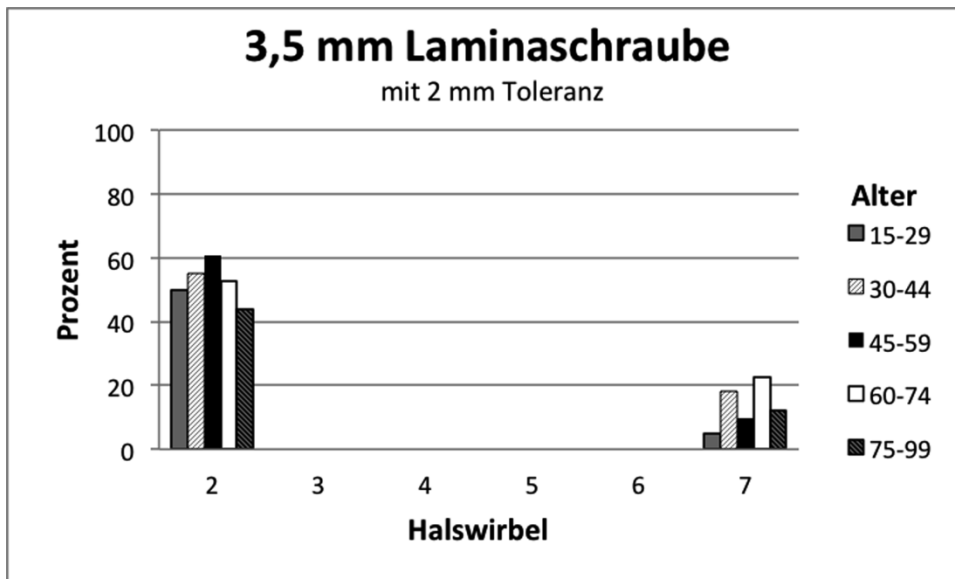
Halswirbel	Alter									
	männlich					weiblich				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	45,24	57,14	59,26	72,22	36,67	60,00	53,12	62,50	36,36	50,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,38	35,71	9,26	27,78	3,33	10,00	3,12	10,00	18,18	19,44

**Tab. 41:** Prozentualer Anteil der platzierbaren Laminaschrauben aufgrund einer ausreichenden Breite ohne Berücksichtigung der Höhe mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

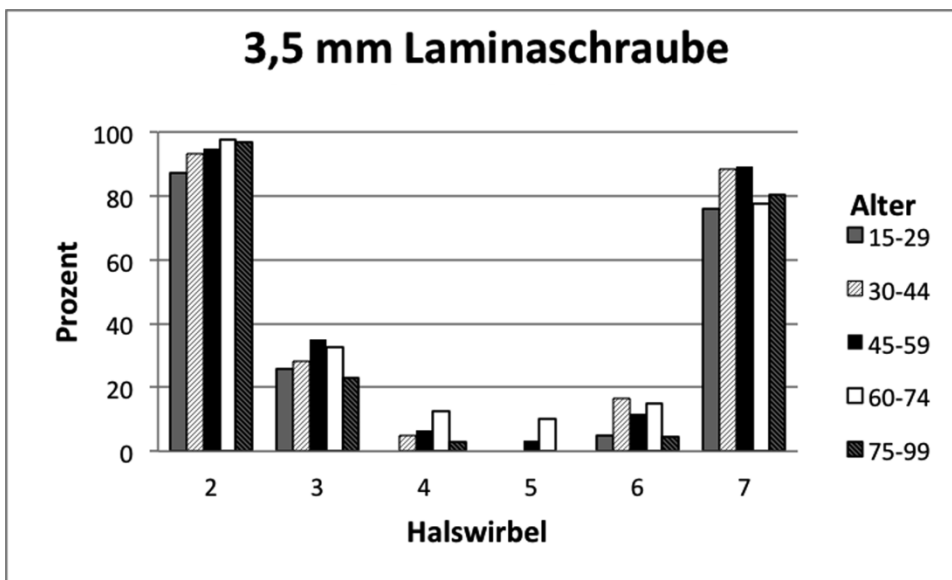
Halswirbel	3,5 mm Schraube		4,0 mm Schraube	
	ohne Toleranz	mit Toleranz	ohne Toleranz	mit Toleranz
2	93,79	53,11	89,44	34,16
3	29,28	0,00	12,77	0,00
4	5,00	0,00	2,19	0,00
5	2,20	0,00	0,00	0,00
6	10,28	0,00	2,18	0,00
7	83,23	12,42	64,60	4,97

**Tab. 42:** Prozentualer Anteil der platzierbaren Laminaschrauben aufgrund einer ausreichenden Höhe ohne Berücksichtigung der Breite mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Halswirbel	3,5 mm Schraube		4,0 mm Schraube	
	ohne Toleranz	mit Toleranz	ohne Toleranz	mit Toleranz
2	100,00	100,00	100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00
4	100,00	99,68	100,00	99,37
5	100,00	100,00	100,00	100,00
6	99,69	99,38	99,38	99,38
7	100,00	100,00	100,00	100,00



**Abb. 99:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7



**Abb. 100:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

### 3.7.5 Platzierbarkeit einer 4,0 mm Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Eine ausreichende Breite und Höhe für 4,0 mm Laminaschrauben mit Sicherheitsabstand bieten nur 34,16 % der betrachteten C2-Laminae und 4,97 % der vermessenen C7-Laminae (Tabelle 43). Männliche Patienten sind häufiger als weibliche instrumentierbar.

Die Möglichkeit einer Verschraubung ist in den verschiedenen Altersgruppen bei einem ähnlichen prozentualen Anteil der Patienten möglich (Tabellen 44-45, Abbildungen 101-102).

Ohne eine 2 mm Sicherheitstoleranz wäre auch eine Osteosynthese der C3-, C4- und C6-Laminae möglich (Tabelle 43).

Bei ausschließlicher Betrachtung der Breite als Kriterium für eine Schraubenplatzierung wären wie bei der 3,5 mm Schraube genauso viele Laminae instrumentierbar wie bei der Berücksichtigung der Höhen- und Breitendurchmesser (Tabelle 41). Analog zur 3,5 mm Laminaschraube wären bei alleiniger Berücksichtigung der Laminhöhen bei 99 % bis 100 % der Wirbel Schrauben platzierbar (Tabelle 42).

**Tab. 43:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Halswirbel	mit 2 mm Sicherheitstoleranz			ohne 2 mm Sicherheitstoleranz		
	Gesamt	männlich	weiblich	Gesamt	männlich	weiblich
2	34,16	34,30	34,00	89,44	86,05	93,33
3	0,00	0,00	0,00	12,77	13,95	11,41
4	0,00	0,00	0,00	2,19	3,49	0,68
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	2,18	4,07	0,00
7	4,97	5,23	4,67	64,60	70,93	57,33

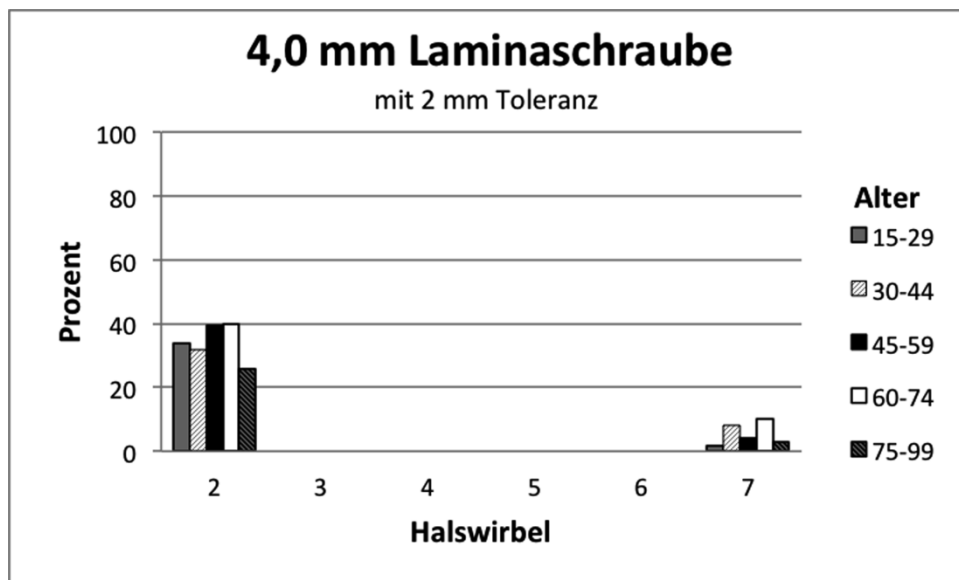
**Tab. 44:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen

Halswirbel	Alter				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	33,87	31,67	39,36	40,00	25,76
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,61	8,33	4,26	10,00	3,03

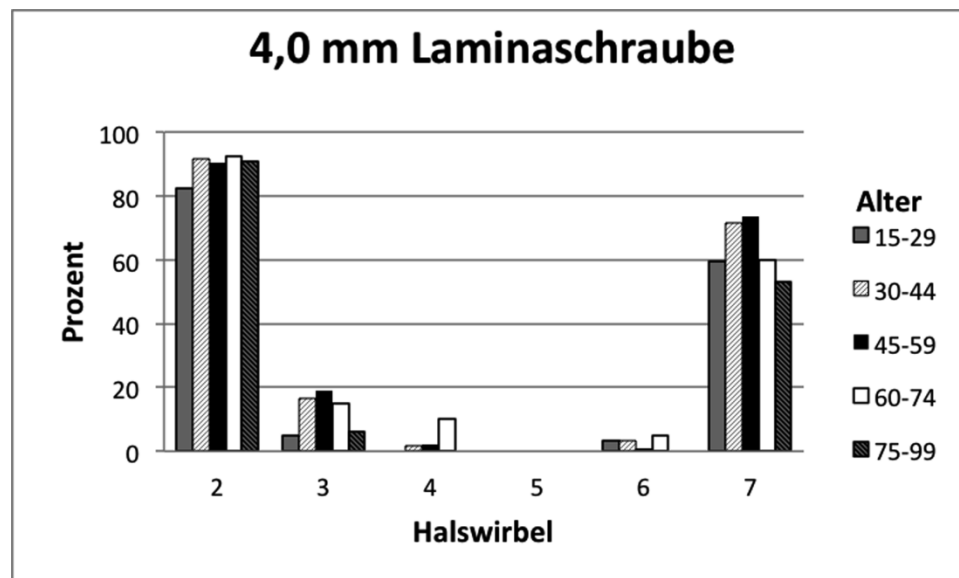
**Tab. 45:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen

Halswirbel	Alter									
	männlich					weiblich				
	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99	15-29	30-44	45-59	60-74	75-99
2	26,19	32,14	42,59	61,11	16,67	50,00	31,25	35,00	22,73	33,33
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,38	17,86	3,70	5,56	0,00	0,00	0,00	5,00	13,64	5,56





**Abb. 101:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7



**Abb. 102:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

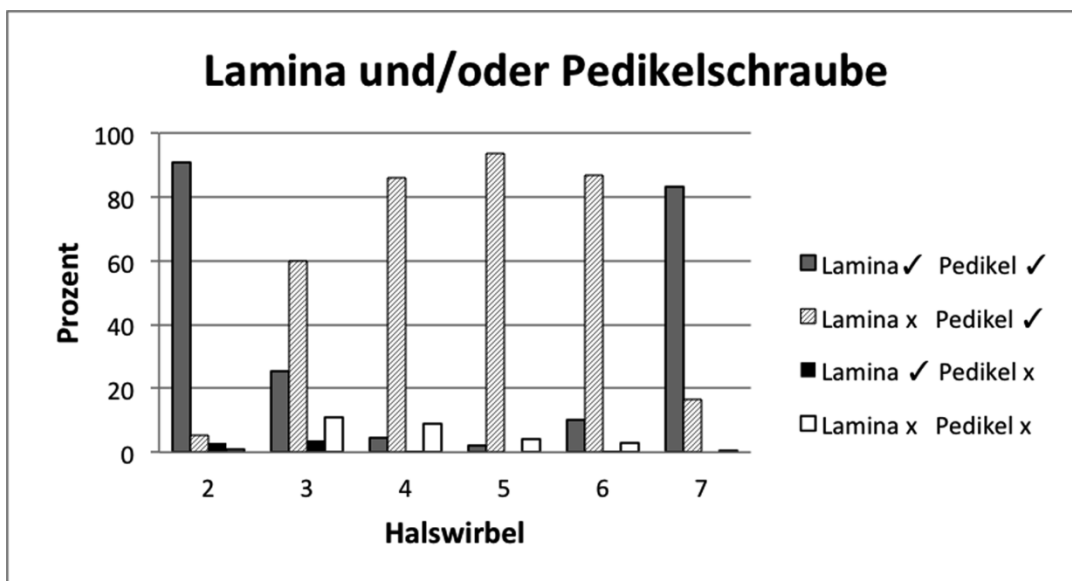
### 3.7.6 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschraube ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Es wird untersucht, wie viele der betrachteten Halswirbel sowohl eine Laminaschraube, als auch eine ipsilaterale Pedikelschraube aufnehmen könnten. Als Kriterium wird eine

Breite und Höhe von über 3,5 mm festgelegt. Weiterhin wird geprüft, in wie vielen Fällen lediglich eine Pedikelschraube, aber keine Laminaschraube auf derselben Seite möglich wäre. Zudem wird der prozentuale Anteil der Wirbel ermittelt, bei denen nur eine Lamina-, jedoch keine ipsilaterale Pedikelschraube platzierbar wäre. Auch der Anteil der Strukturen, die weder in der Lamina, noch im gleichseitigen Pedikel eine Schraube aufnehmen könnten, wird bestimmt. Bei methodikbedingtem Fehlen eines Messwertes, zum Beispiel bei einer Fraktur des betreffenden Wirbelabschnittes, wird der entsprechende Parameter im Einzelfall nicht zur statistischen Analyse berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle und in der folgenden Graphik aufgeführt (Tabelle 46, Abbildung 103).

**Tab. 46:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Schrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, ✓: Schraube platzierbar, x: Schraube nicht platzierbar

Halswirbel	Lamina ✓ Pedikel ✓	Lamina x Pedikel ✓	Lamina ✓ Pedikel x	Lamina x Pedikel x
2	90,97	5,28	2,80	0,93
3	25,55	59,81	3,73	10,87
4	4,69	85,94	0,31	9,01
5	2,20	93,71	0,00	4,09
6	9,97	86,60	0,31	3,11
7	83,23	16,46	0,00	0,31



**Abb. 103:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz, C2-C7

### 3.7.7 Spondylarthrose: Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikel- oder Laminaschraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz

Um den Einfluss einer Spondylarthrose auf die Machbarkeit von Pedikel- oder Laminaschrauben zu untersuchen, wird der Grad der Spondylarthrose anhand einer standardisierten Klassifikation für die Wirbelhöhen C2 bis C7 bestimmt. Es wird getestet, wie groß der Anteil der Laminae und Pedikel ist, in den eine 3,5 mm Schraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz aufgrund einer ausreichenden Höhe und Breite Platz finden würde. Die prozentualen Anteile der operationsgeeigneten Strukturen werden in den Gruppen Spondylarthrose Grad I, Grad II und Grad 0 (keine Spondylarthrose) miteinander verglichen.

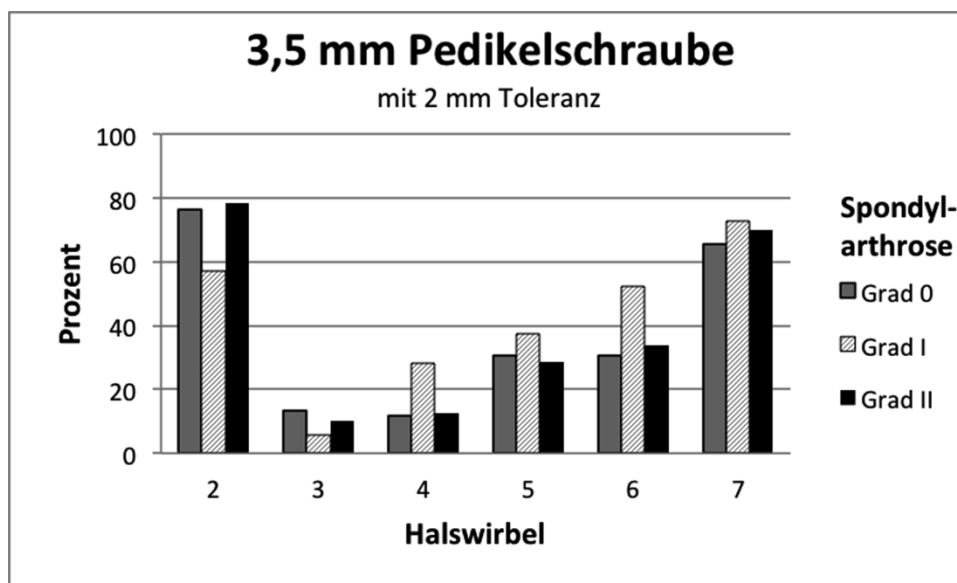
Beim Vergleich lässt sich sowohl bei den Pedikel-, als auch bei den Laminaschrauben kein richtungsweisender Unterschied bezüglich des prozentualen Anteiles der operationstauglichen Strukturen zwischen den Gruppen unterschiedlicher Spondylarthroseausprägung ausmachen (Tabellen 47-48, Abbildungen 104-105). Keine der untersuchten C3- bis C6-Laminae erfüllt unabhängig von der Spondylarthrose die Voraussetzung für eine Schraubeneinbringung.

**Tab. 47:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose

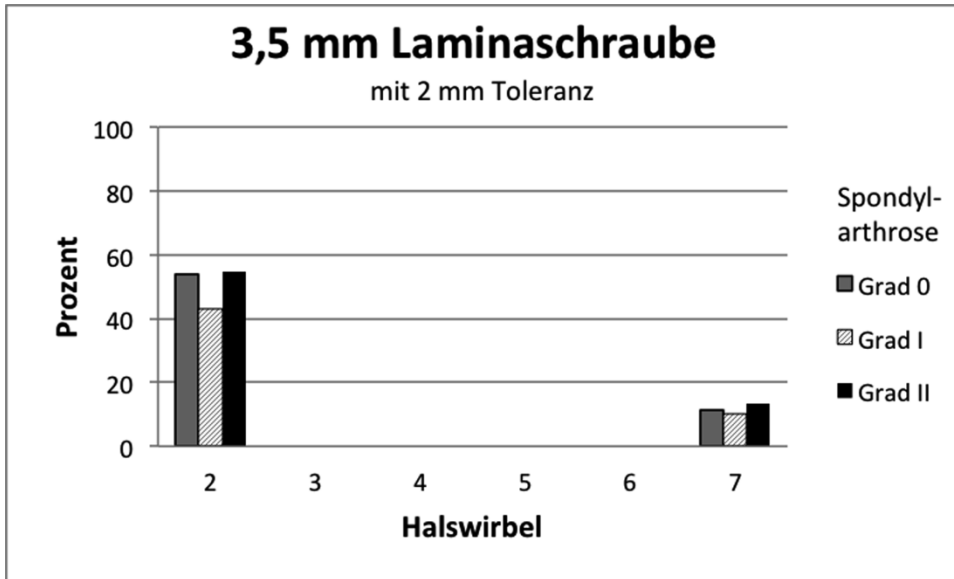
Halswirbel	Spondylarthrose		
	Grad 0	Grad I	Grad II
2	76,19	57,14	78,31
3	13,44	5,56	10,00
4	11,76	28,05	12,50
5	30,68	37,50	28,57
6	30,77	52,38	33,96
7	65,38	72,86	69,91

**Tab. 48:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose

Halswirbel	Spondylarthrose		
	Grad 0	Grad I	Grad II
2	53,81	42,86	54,76
3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00
7	11,54	10,00	13,39



**Abb. 104:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose, C2-C7



**Abb. 105:** Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose, C2-C7

## 4. Diskussion

### 4.1 Patientenkollektiv

Die Auswahl der in unserer Studie eingeschlossenen Patienten erfolgte nach dem Zufallsprinzip aus dem Pool der Polytraumapatienten des Universitätsklinikums Bonn. Bei der Häufigkeitsverteilung bezüglich einer Polytrauma-CT-Anfertigung fiel eine Dominanz des männlichen Geschlechtes auf, die auf ein höheres Risiko der männlichen Bevölkerung für ein Polytrauma hinweist. Besonders deutlich wurde dieses Überwiegen männlicher Patienten in der Altersgruppe 17-29 Jahren, sodass davon auszugehen ist, dass junge Männer (unter 30 Jahre) im Vergleich zu jungen Frauen ein circa doppelt so hohes Risiko haben, ein Polytrauma zu erleiden. Cryer et al. kamen in einer Studie diesbezüglich zu ähnlichen Ergebnissen. Sie zeigten, dass besonders junge Männer an Unfällen mit motorisierten Fahrzeugen beteiligt sind (Cryer et al., 1996). Diese Unfälle stellen eine Hauptursache für Polytraumata dar (Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie, 2017).

Die umgekehrte Geschlechterverteilung in der Altersgruppe der über 60-Jährigen lässt zwei Einflussfaktoren vermuten. Zum einen ist die Lebenserwartung der Frauen höher, als die der Männer, womit Frauen im Vergleich einen größeren Anteil an der älteren Gesellschaft stellen (Manton, 1997). Zudem bilden weibliche Patienten die Mehrheit der Osteoporose-Erkrankten, da die Erkrankung besonders postmenopausale und senile Patientinnen betrifft. Bei Osteoporose steigt das Frakturrisiko und somit auch die Indikationswahrscheinlichkeit für eine CT. Bei der aktuellen demographischen Entwicklung ist zu vermuten, dass die Anzahl der älteren weiblichen Bürger, und folglich auch die Anzahl der osteoporosebedingten Frakturen, zunehmen wird (Institute of Medicine, 2012; Kim et al., 2015).

### 4.2 Geschlechtsunterschiede

Der Unterschied der knöchernen Dimensionen zwischen den Geschlechtern wurde vielfach beschrieben (Liu et al., 2010; Stemper et al., 2009; Vasavada et al., 2008; Wasinpongwanich et al., 2014). In der vorliegenden Untersuchung wurden beim männlichen Patientenkollektiv durchschnittlich größere lineare und anguläre Messwerte

der untersuchten knöchernen Strukturen ermittelt als bei der weiblichen Patientengruppe. Die C2-Laminabreite stellte hierbei eine Ausnahme dar. Bei diesem Parameter fielen die Messwerte der weiblichen Patienten im Durchschnitt größer aus als die der männlichen.

#### 4.3 Messparameter im Seitenvergleich

Bei der Laminabreite C2 (äußere Kortikalis), der Laminabreite C2 (innere Kortikalis), dem Pedikelwinkel C2 sowie der Laminalänge C6 und C7 wurde im Wilcoxon-Test ein signifikanter Seitenunterschied festgestellt. Für diese Parameterkonstellation lassen sich verschiedene Erklärungsansätze finden.

Eine individuelle Ausbildung degenerativer Veränderungen oder Prominenzen gewisser Strukturen, können zu einer Beeinflussung der in dieser Studie erhobenen Messdaten führen. Es ist anzunehmen, dass der vorgenommene Seitenvergleich schon durch einige Patienten mit den genannten anatomischen Abweichungen verändert werden kann.

Eventuelle Messfehler kommen ebenso als Ursache für die differierenden Messwerte im Seitenvergleich in Frage. Gerade bei Messungen wie der Laminalänge oder dem Pedikelwinkel können kleinste Veränderungen der Achsenausrichtung bereits relativ große Messwertunterschiede verursachen. Es wurden jedoch auch in anderen Studien signifikante Seitenunterschiede jeweils unterschiedlicher Parameter festgestellt. So ermittelten Keskin et al. unter anderem ebenfalls signifikante Unterschiede der C7-Laminalänge rechts und links (Keskin et al., 2015). Auch Saluja et al. und Xu et al. stellten Unterschiede einiger HWS-Parameter im Seitenvergleich fest (Saluja et al., 2015; Xu et al., 1995).

Bei der Betrachtung der Laminabreite C2 (innere Kortikalis) sollte berücksichtigt werden, dass die Messung an dem Punkt der geringsten Laminabreite, bezogen auf die äußeren Kortikalisgrenzen, durchgeführt wurde. Bei der Messung der Strecke zwischen den inneren Kortikalisgrenzen am Laminaisthmus fiel auf, dass die Kortikalis häufig einen unsteten, welligen Verlauf zeigte, sodass der Messwert nicht in allen Fällen der tatsächlich geringsten Strecke zwischen den Kortikalisgrenzen entsprach. Eine minimale Versetzung des Messvorganges hätte bei einem unregelmäßigen Kortikalisverlauf zu deutlich differierenden Messwerten geführt. Es ist anzunehmen, dass die Ursache für den

signifikanten Rechts-Links-Unterschied der Laminabreite (innere Kortikalis) unter anderem in diesem beschriebenen unregelmäßigen Verlauf der Kortikalis liegt. Lamina- und Pedikelbreiten (innere Kortikalis) der weiteren vermessenen Wirbel wiesen demgegenüber keinen signifikanten Seitenunterschied auf.

Aufgrund des möglichen signifikanten Seitenunterschiedes sollte dieser durch seitengetrennte Betrachtung bei der chirurgischen Planung berücksichtigt werden.

#### 4.4 Lamina- und Pedikelquerschnitt

Bei der Messung der Laminae und Pedikel zeigten sich deutliche Unterschiede im Querschnitt. Dies wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Höhen- und Breitenmessungen deutlich. Die Laminae waren durch einen deutlich ovalen Querschnitt mit einer größeren Höhe als Breite gekennzeichnet. Die Pedikel besaßen ein annähernd rundes Erscheinungsbild im Querschnitt mit einem im Vergleich zur Höhe im Durchschnitt nur leicht geringeren Breitendurchmesser. In einem Teil der untersuchten Fälle war die Pedikelhöhe kleiner als die Pedikelbreite. Insgesamt waren die Laminahöhen durchschnittlich größer als die Pedikelhöhen und die Pedikelbreiten größer als die Laminabreiten.

Die hier vorgelegten Messungen der Pedikel- und Laminabreiten sind vergleichbar mit vorherigen publizierten Werten und besitzen eine vergleichbare morphologische Ausprägung von C2 bis C7 (Bozbuga et al., 2004; Ji et al., 2015; Hacker et al., 2008; Koller et al., 2008; Patwardhan et al., 2012; Tan et al., 2004; Uğur et al., 2000; Wasinpongwanich et al., 2014; Yusof und Shamsi, 2012). Messwertdifferenzen zu anderen Publikationen können in unterschiedlichen Mess- und Auswertungstechniken begründet sein. Auch eine differierende Schichtdicke und Auflösung im CT können unterschiedliche Ergebnisse zur Folge haben. Ob die ethnische Zugehörigkeit einen messbaren Effekt auf Wirbel- beziehungsweise Pedikeldimensionen hat, wird kontrovers diskutiert. Chazono et al. beschrieben beispielsweise in einer retrospektiven Literaturanalyse, dass sie im Unterschied zu Munusamy et al. keinen signifikanten Unterschied der linearen Messungen bei ethnischen Disparitäten feststellen konnten (Chazono et al., 2012; Munusamy et al., 2015). Jedoch scheint die Körpergröße Einfluss



auf die Pedikelausmaße zu haben. So kann es je nach durchschnittlicher Körpergröße der vermessenen Population zu unterschiedlichen Messergebnissen kommen (Zhuang et al., 2011).

#### 4.5 Durchgängig kortikaler Aufbau

Die Laminae der Halswirbelsäule zeigten häufiger einen soliden kortikalen Aufbau als die HWS-Pedikel. Vor allem im Bereich der Wirbel C4 und C5 war die Kompaktheit der Laminakortikalis häufig gegeben (33,44 % und 41,82 %). Laminae und Pedikel der Halswirbel C2 und C7 waren nur in sehr wenigen Fällen und im Vergleich mit den anderen Halswirbelsäulenabschnitten am seltensten kortikal durchbaut. Ein durchgängig kortikaler Aufbau der Pedikel war in 0,31 % (C7) bis 11,95 % (C5) der Fälle vorhanden.

Karaikovic et al. kamen 1997 bei der CT-Bild basierten Analyse von 636 Pedikeln zu ähnlichen Ergebnissen. Sie beschrieben, dass 0,9 % der C2-Pedikel, 2,8 % der C3- und C4-Pedikel und 3,8 % der C5-Pedikel über eine kompakte Kortikalis verfügten (Karaikovic et al., 1997). Diese leicht niedriger ausfallenden Ergebnisse können einerseits durch die oben aufgeführten Kriterien bezüglich der Vergleichbarkeit verschiedener Studien bedingt sein. Ebenso kann eine relativ geringe Fallzahl zu Verzerrungen der Ergebnisse führen. Dies wird in der jetzt vorgelegten Studie mit einer Analyse von 1927 Pedikeln und 1924 Laminae vermieden.

Ob ein durchgängig kortikaler Aufbau einen Effekt auf die Schraubeneinbringung und die Ausreißfestigkeit einer platzierten Schraube hat, ist separat zu betrachten. Zu vermuten ist, dass die Schraube an der Seite der soliden Kortikalis in Richtung der fehlenden Kortikalis abgelenkt wird. Zudem ist eine verminderte Ausreißfestigkeit bei fehlender Kortikalis wahrscheinlich.

#### 4.6 Anatomische Voraussetzungen für eine Schraubenplatzierung

Bei Festlegung ausreichender Breiten- und Höhendurchmesser als Bedingung für eine Schraubeneinbringung zeigte sich in den meisten Fällen die Lamina- bzw. Pedikelbreite als limitierender Faktor für die Möglichkeit einer Verschraubung. Einige vorhergehende Publikationen legten allein die Breitendurchmesser ohne Betrachtung der Höhe als

Voraussetzung fest, ob eine Schraube platziert werden kann (Bhatnagar et al., 2010; Patwardhan et al., 2012). Diese Wahl des Kriteriums erscheint sinnvoll, da die Breite in den meisten Fällen den kleinsten Durchmesser der im Fokus stehenden Struktur darstellt.

Bei mangelnder Kenntnis der Pedikelbreite kann es aufgrund einer geringen Breite bei Eindrehung der Schraube zu einer seitlichen Berstung der Kortikalis kommen, sodass die Gefahr einer Rückenmarks- oder einer A. vertebralis-Verletzung besteht (Burke et al., 2005; Peng et al., 2009; Wright und Laurysen, 1998). Eine solche Verletzung könnte sich in neurologischen Ausfallserscheinungen oder Blutungen (ggf. mit Rückenmarkskompression) manifestieren. Die laterale Pedikelwand ist durch ihre schmale Kortikalis für eine Berstung besonders prädestiniert (Panjabi et al., 2000; Yukawa et al., 2009). Um dieses Risiko zu evaluieren und durch die korrekte Schraubenwahl zu minimieren, können in der präoperativen Bildgebung bereits die Pedikelbreiten des zu instrumentierenden Wirbels bestimmt werden.

In der vorliegenden Studie wurde deutlich, dass durch die zusätzliche Berücksichtigung der Pedikelhöhe in weniger Fällen als bei der alleinigen Betrachtung der Breiten die für eine Schraubenplatzierung benötigten Durchmesser der Struktur vorlagen. Somit war bei einem geringeren Anteil der vermessenen Pedikel eine potenzielle Schraubeneinbringung möglich. Auf Höhe des 3. Halswirbels verringerte sich beispielsweise durch die zusätzliche Berücksichtigung der Höhe die Anzahl operationsgeeigneter Pedikel (3,5 mm Schraube mit 2 mm Sicherheitstoleranz) um 0,31 Prozentpunkte. Bei C4 betrug die Reduktion 1,24, bei C5 10,06, bei C6 11,49 und bei C7 10,24 Prozentpunkte. Auf die Anzahl der sicher implantierbaren Schrauben im C2-Pedikel hatte die zusätzliche Berücksichtigung der Höhe keinen Effekt. Es sei auch erwähnt, dass die Messung der Pedikelhöhe auf Höhe des 2. Halswirbels aufgrund besonderer anatomischer Bedingungen an dem Punkt der geringsten Pedikelbreite stattfand, sodass die Pedikel gegebenenfalls an einer anderen Stelle über geringere Höhendurchmesser verfügten. Lägen geringere Pedikelhöhen vor, würde dies möglicherweise die Anzahl der für die Instrumentierung geeigneten Pedikel reduzieren. Ob tatsächlich geringere Pedikelhöhen bei C2 vorliegen und sich daraus eine klinische Relevanz für die Schraubenplatzierung ergibt, ist gesondert zu betrachten.

Bei alleiniger Berücksichtigung der Pedikelbreite der Wirbel C3 bis C7 wäre es folglich in einigen Fällen zu optimistischeren Prognosen bezüglich der Umsetzbarkeit der Schraubenanlage gekommen. Eine Platzierung der Pedikelschraube hätte in diesen Fällen, wie oben erwähnt, unter Umständen zu einer Berstung der Kortikalis, zu einer Schraubenfehlage oder zu Verletzungen führen können. Da die Spinalnerven durch die Foramina intervertebralia im Sulcus nervi spinalis, und somit in unmittelbarer Nähe zum darunterliegenden Pedikel, verlaufen, kann eine kraniale Perforation der Kortikalis bei zu geringer Höhe des Pedikels eine Verletzung des Spinalnervs mit radikulären Ausfallserscheinungen nach sich ziehen (Grass et al., 2006).

Unter Zusammenschau dieser Risiken wird deutlich, dass die Berücksichtigung der Pedikelhöhe eine sinnvolle Ergänzung zur alleinigen Betrachtung der Pedikelbreite darstellt, um eine Pedikelschraubenplatzierung anhand einer präoperativen HWS-CT zu planen.

Die Lamina bietet durch ihren schmalen, länglichen Querschnitt andere anatomische Bedingungen als der Pedikel. Die Anzahl der realisierbaren Schrauben war sowohl bei Festlegung der Laminabreite als Kriterium, als auch bei gleichzeitiger Betrachtung von Breite und Höhe praktisch identisch. Eine geringe Laminabreite war also in allen getesteten Laminae der limitierende Faktor. Zwar verfügten nicht alle Laminae von C4 bis C6 über eine Höhe von mehr als 5,5 mm, jedoch erfüllten diese Laminae auch nicht das Kriterium einer ausreichenden Breite, sodass sie ohnehin nicht als instrumentierbar klassifiziert worden wären. Daraus ergibt sich, dass die Messung der Laminahöhe entbehrlich ist. Entscheidend für die Operabilität ist die Laminabreite. Es ist zu beachten, dass die Laminahöhe, ähnlich wie die C2-Pedikelhöhe, am Punkt der geringsten Breite der Struktur gemessen wurde. Eine Bestimmung der absolut geringsten Laminahöhe könnte weitere Erkenntnisse bezüglich eines Effektes auf die Möglichkeiten der Schraubenplatzierung bringen.

#### 4.7 Platzierbarkeit von Lamina- und Pedikelschrauben

Ausreichende Höhen- und Breitendurchmesser der Laminae und Pedikel wurden als Kriterium für die Machbarkeit einer Schraubenplatzierung festgelegt. Es wurde getestet,

wie viele Schrauben mit einem Durchmesser von 3,5 mm und 4,0 mm mit oder ohne Berücksichtigung einer 2 mm Sicherheitstoleranz in die untersuchten Strukturen eingebracht werden könnten. Die Analyse zeigte, dass Männer grundsätzlich häufiger über diese anatomischen Voraussetzungen verfügten. Nur die C2-Lamina bot in unserer Studie minimal häufiger bei den weiblichen als bei den männlichen Patienten die Voraussetzung für eine Instrumentierung. Bei Vergleich der Platzierbarkeit einer 3,5 mm Pedikelschraube (mit 2 mm Sicherheitstoleranz) war der Geschlechtsunterschied in den Altersgruppen 17-29 Jahre und 45-59 Jahre mit einer Differenz der prozentualen Anteile von 18,1 Prozentpunkten bzw. 27,69 Prozentpunkten besonders groß.

#### 4.7.1 Platzierbarkeit einer Pedikelschraube

Für die Halswirbelsäule ist für die Pedikel der mittleren Wirbel C3 bis C6 durch ihre geringen Höhen- und Breitendurchmesser meist die 3,5 mm Schraube geeignet. Der 2. und der 7. Halswirbel verfügen über prominentere Strukturen, sodass aufgrund der Breiten- und Höhendurchmesser auch häufig eine 4,0 mm Pedikelschraube verwendet werden kann. Bei erhöhtem Sicherheitsabstandsbedürfnis, kann auch die 3,5 mm Schraube verwendet werden.

#### 4.7.2 Platzierbarkeit einer Laminaschraube

Wie bereits erwähnt, sind die Laminae der HWS durch geringere Breiten gekennzeichnet als vergleichbare Pedikel. Daher sind Schraubensetzungen unter Einhalten des Sicherheitsabstandes lediglich auf Höhe des 2. und 7. Halswirbels möglich. Die Einbringung einer Laminaschraube auf Höhe der mittleren Halswirbel C3 bis C6 wäre nur realisierbar, wenn auf die Sicherheitstoleranz als Voraussetzung verzichtet wird. Die C2-Lamina bot im Gegensatz zu den anderen analysierten Strukturen beim weiblichen Patientenkollektiv häufiger die anatomischen Voraussetzungen für eine Schraubenplatzierung als bei dem männlichen Kollektiv (Ausnahme 4,0 mm Schraube mit 2 mm Toleranz).

#### 4.7.3 Platzierbarkeit einer 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschraube ohne 2 mm Sicherheitstoleranz

Die Untersuchung der 1927 Pedikel und 1924 Laminae ergab, dass in den meisten Fällen auf Höhe des 2. und 7. Wirbels sowohl die Lamina, als auch der ipsilaterale Pedikel über größere Breiten- und Höhendurchmesser als 3,5 mm verfügten und somit für eine Instrumentierung geeignet wären (90,97 % bzw. 83,23 %). Die mittleren Halswirbel 3 bis 6 besaßen in den meisten Fällen (59,81 % bis 93,71 %) die anatomischen Voraussetzungen für eine Pedikel-, jedoch nicht für eine gleichseitige Laminaschraube. Der prozentuale Anteil der Wirbel, die lediglich eine Laminaschraube, aber keine ipsilaterale Pedikelschraube aufnehmen könnte, war gering (0,00 % bis 3,73 %). Generell war eine Form der Instrumentierung bei den meisten Wirbeln des Patientenkollektivs möglich. Lediglich bei 0,31 % (C7) bis 10,87 % (C3) lagen die Durchmesser unter 3,5 mm, sodass weder eine Pedikel-, noch eine Laminaschraube eingebracht werden könnte.

#### 4.8 Einflussfaktoren auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Möglichkeit einer Schraubenplatzierung, die Ausreißfestigkeit und das postoperative Outcome. Angemessene Höhen- Längen- und Breitendurchmesser sowie die Winkel, die mit der Sagittal- und Transversalebene gebildet werden, stellen unter anderem anatomische Voraussetzungen für eine Instrumentierung dar. Zudem sind Schraubendesign (Abshire et al., 2001; Chao et al., 2008; Krenn et al., 2008) und -durchmesser, die Operationstechnik (George et al., 1991; Pfeiffer et al., 1996; Ruland et al., 1991), das Vorliegen von Deformitäten und die Knochendichte (Halvorson et al., 1994; Hirano et al., 1997; Okuyama et al., 1993; Soshi et al., 1991) entscheidende Faktoren, die die Realisierbarkeit einer Verschraubung beeinflussen. Ob Alter, Geschlecht, die Spondylarthroseausprägung und die Kontinuität der C2-Pedikelkortikalis ebenfalls Einfluss auf die Möglichkeit einer Schraubenosteosynthese haben, wird im Folgenden betrachtet.

#### 4.8.1 Einfluss des Alters auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung

Ein Zusammenhang zwischen dem Alter und der Möglichkeit der Lamina- oder Pedikelschraubeneinbringung unter Berücksichtigung der Breiten- und Höhendurchmesser konnte in dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Bei lediglich geringen Unterschieden sowie dem Fehlen einer tendenziellen Entwicklung bezüglich der Anzahl der für die Instrumentierung geeigneten Pedikel und Laminae in den verschiedenen Altersgruppen, war ein Alterszusammenhang nicht auszumachen, sodass sich anhand des Alters keine zuverlässige Prognose zur Umsetzbarkeit einer Schraubenplatzierung sowie der Auswahl des Schraubendurchmessers treffen lässt.

Zu dieser Fragestellung gibt es bisher wenig publizierte Daten. Yu et al. stellten, ähnlich zu den hier vorgelegten Ergebnissen, im Bereich der Lendenwirbelsäule keinen statistisch signifikanten Unterschied der Pedikelhöhen und -breiten in verschiedenen Altersgruppen fest (Yu et al., 2015). Im thorakalen Wirbelsäulenabschnitt T1 bis T6 ermittelte Yus Arbeitsgruppe eine proportionale Zunahme der durchschnittlichen Pedikelhöhen und -breiten der meisten untersuchten Wirbel mit zunehmendem Alter (Yu et al., 2014). Trotzdem war der prozentuale Anteil der untersuchten Wirbel mit einer Breite über 4,5 mm in der ältesten Studiengruppe teilweise kleiner als in der Gruppe der 50 bis 70-Jährigen. Somit konnte auch in dieser Studie bei zunehmendem Alter keine stetige Zunahme des prozentualen Anteils der Wirbel, die für eine Instrumentierung geeignet wären, festgestellt werden. Morales-Avalos et al. kamen zu differierenden Ergebnissen: Sie stellten bei Männern eine Zunahme der Pedikeldurchmesser der Brustwirbelsäule und bei Frauen eine Abnahme der Durchmesser mit steigendem Alter fest (Morales-Avalos et al., 2014).

Es ist anzunehmen, dass verschiedene Faktoren Einfluss auf die Pedikel- und Laminadimensionen nehmen. Sowohl Knochenanbau z.B. in Form von Spondylose, als auch knochenabbauende Prozesse wie eine Osteoporose stellen Ursachen für anatomische Veränderungen der Wirbelsäule dar, die im Laufe des Lebens in Erscheinung treten können (Burger et al., 1997; Ismail et al., 1999; Nicholson et al., 1993). Auch andere degenerative Veränderungen, wie beispielsweise eine Osteochondrose oder Wachstumseffekte können zu einem deformierenden Umbau der Wirbel führen (Tóth, 2003). Es ist bekannt, dass die Durchmesser der langen Röhrenknochen im Alter durch

Wachstum oder periostale Formationen zunehmen können (Ruff und Hayes, 1988). Es wird angenommen, dass diese periostalen Formationen einen Kompensationsmechanismus einer Osteoporose zum Beispiel im Rahmen eines postmenopausalen Östrogenmangels mit abnehmender Knochendichte darstellen (Ahlborg et al., 2003). Bei Übertragung dieser Kenntnisse auf die Strukturen der Wirbelsäule lassen sich entgegengesetzte Effekte auf die Durchmesser erkennen, wobei das Auftreten und Ausmaß der Faktoren wegen der individuell unterschiedlichen Ausprägung nicht vorhersagbar sind.

In einer prospektiven Studie könnten die Einflüsse der genannten Aspekte auf die anatomischen Querschnitte der Laminae und Pedikel untersucht werden. Eine Analyse, ob sich die untersuchten Durchmesser bei einem Individuum in verschiedenen Lebensabschnitten so verändern, dass eine Schraubeneinbringung in gewissen Lebensphasen möglich und in anderen Lebensabschnitten nicht möglich wäre, ist aus Gründen des Strahlenschutzes nicht möglich.

#### 4.8.2 Einfluss des Geschlechtes auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung

Die Mehrzahl der untersuchten Laminae und Pedikel hatte beim männlichen Patientenkollektiv größere Durchmesser als bei der weiblichen Patientengruppe. Die für eine Schraubeneinbringung festgelegte Voraussetzung mit vorliegenden Mindestdurchmessern der jeweiligen Höhe und Breite wurde folglich von einem höheren prozentualen Anteil der Männer als der Frauen erfüllt, sodass die Schlussfolgerung gezogen werden kann, dass die Laminae und Pedikel männlicher Patienten häufiger instrumentierbar sind als die der Frauen. Eine Ausnahme stellt die C2-Laminschraube dar, die häufiger bei weiblichen Patienten eingebracht werden könnte.

Die bereits erwähnten Geschlechtsunterschiede der knöchernen Wirbelsäule umfassen auch die Pedikeldimensionen (Morales-Avalos et al., 2014; Muslim et al., 2011). Die in der vorliegenden Studie gezeigten größeren Pedikeldurchmesser der HWS bei männlichen Patienten sind mit den Ergebnissen vorhergehender Studien vereinbar (Chanplakorn et al., 2014; Chazono et al., 2012; Onibokun et al., 2009). Nicht in allen vorhergehenden Studien konnte bei geringeren Mittelwerten der Pedikeldurchmesser

weiblicher Patienten auch ein statistisch signifikanter Geschlechtsunterschied nachgewiesen werden (Yusof et al., 2006). Die Laminadurchmesser wurden im Gegensatz zu den aktuell gemessenen Ergebnissen in vorhergehenden Publikationen auch beim zweiten Halswirbel bei männlichen Untersuchungspersonen als größer beschrieben (Jang et al., 2011; Saetia und Phankhongsab, 2015; Wang et al., 2015).

#### 4.8.3 Einfluss der Spondylarthrose auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung

Die hier vorgestellten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich anhand der Kenntnis der Spondylarthrose-Ausprägung mittels präoperativer Bildgebung keine verlässliche Prognose bezüglich der Machbarkeit einer Schraubeneinbringung treffen lässt. Sowohl bei Lamina-, als auch bei Pedikelschrauben, zeigten sich bei unterschiedlich ausgeprägter Spondylarthrose lediglich geringe Unterschiede in Bezug auf den prozentualen Anteil der als operationstauglich klassifizierten Strukturen. Exemplarisch erfolgte die Analyse der Möglichkeit einer Schraubenplatzierung (3,5 mm Schraube mit 2 mm Toleranz) aufgrund ausreichender Breiten- und Höhendurchmesser.

Soweit wir wissen, ist unsere Studie die erste, welche einen Einfluss der Spondylarthrose auf die Möglichkeit einer Schraubeneinbringung untersucht. Eine weiterführende prospektive Studie könnte Aufschluss darüber geben, ob sich die Möglichkeit der Schraubenplatzierung bei einem Individuum in Korrelation zum Auftreten einer Spondylarthrose verändert und ob die Spondylarthrose andere Wirbelparameter, wie Winkel und Längen der Laminae und Pedikel beeinflusst.

#### 4.8.4 Einfluss der C2-Pedikelkortikalis auf die Möglichkeit der Schraubeneinbringung

Es erfolgte eine Beurteilung des C2-Pedikelkortikalisquerschnittes am Pedikelisthmus im frontalen Schnittbild im Hinblick auf das Vorliegen einer durchgängigen deutlichen kortikalen Umrandung des Pedikels. Bei 37,38 % der C2-Pedikel lag eine „kontinuierliche“, nicht kontrastgeminderte Kortikalis vor. Pedikel mit dieser kräftigen Kortikalis verfügten im Vergleich zu Pedikeln mit schmaler, computertomographisch „diskontinuierlicher“ Kortikalis nicht über deutlich größere Höhen- und Breitendurchmesser. Unter Berücksichtigung einer Sicherheitstoleranz von 2 mm wäre die Platzierung einer 3,5 mm



Schraube annähernd ebenso häufig bei Pedikeln mit „diskontinuierlicher“, wie bei Pedikeln mit „kontinuierlicher“ Kortikalis möglich gewesen. Somit verfügt die präoperative Klassifizierung der Pedikelkortikalis über keinen prädiktiven Wert bezüglich der Möglichkeit einer Schraubeneinbringung.

Ob eine „kontinuierliche“ Kortikalis am Pedikelisthmus mit positiven Effekten auf eine Schraubenanlage, beispielsweise im Sinne von einer höheren Ausreißfestigkeit oder einer geringeren Rate der Schraubenfehlagen assoziiert ist, kann nicht sicher ausgeschlossen werden. Andere Studien sollten diesen Faktor separat untersuchen.

## 4.9 Limitationen

### 4.9.1 Studienmodell

Aus klinischer Diagnostik vorliegende computertomographisch-anatomische Messdaten eines repräsentativen universitätsklinischen Patientenkollektivs wurden unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich durch Bildung kleinerer Untergruppen (Alter, Geschlecht etc.) zum Teil relativ geringe Fallzahlen in der jeweiligen Gruppe und somit eingeschränkte statistische Aussagequalitäten ergeben könnten. Das Patientenkollektiv zeigte eine für den deutschen Klinikalltag typische ethnische Zusammensetzung, was beim Vergleich mit Studien aus anderen Weltregionen zu berücksichtigen ist. Der Vergleich der dargestellten Ergebnisse mit anderen Publikationen ist zudem durch die Verwendung verschiedener Mess- und Auswertungstechniken, eingeschränkt reproduzierbarer Messverfahren in einigen Publikationen und unterschiedliche Zusammensetzungen des Patientenkollektivs erschwert.

### 4.9.2 Messtechnik

Die Messungen wurden durch eine Person mittels standardisierter Technik durchgeführt. Dabei wurde Wert darauf gelegt, möglichst genaue Angaben für die Einstellung der Messebenen und den Messablauf zu dokumentieren. Individuelle anatomische Gegebenheiten führen dennoch bei einigen Messparametern zu einer relativ großen

Messwertspanne. Die visuell-manuelle Erhebung der Messdaten bedingt subjektive Messungenauigkeiten. Kleinste Veränderungen der Ebenenausrichtung und ein unregelmäßiger Kortikalisverlauf können bereits deutlich differierende Werte bedingen. Zudem wurden degenerative Veränderungen nicht seitengetreunt erfasst.

Um die Validität und Reliabilität der gewonnenen Messdaten zu gewährleisten, wurden einige Messungen beispielsweise aufgrund einer visuell minderwertigen Bildqualität ausgeschlossen. Dies führt jedoch dazu, dass der Datensatz nicht mehr vollständig ist. Fehler des primären Datensatzes im Sinne von schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis, Überlagerungen, Bewegungsartefakten sowie metallbedingten Artefakten, Unschärfe, Verzerrungen oder schlechte Kontrastierung sind Ursache für Messungenauigkeiten und führen gegebenenfalls zur Exklusion aus dem Datensatz.

Bei der standardisierten Messtechnik wurde festgelegt, dass die C2-Pedikelhöhe und die Laminahöhen am ermittelten Punkt der geringsten Breite (Isthmus) gemessen werden, sodass die Struktur gegebenenfalls an einer anderen Stelle einen geringeren Höhendurchmesser aufweisen könnte. Lägen tatsächlich geringere Höhen vor, würde dies möglicherweise die Anzahl der operationstauglichen Wirbel reduzieren.

Auch durch einen geschwungenen Laminaverlauf kann die Anzahl der instrumentierbaren Wirbel geringer sein als in der vorliegenden Arbeit dargestellt. Dies ist darin begründet, dass der Abstand der äußeren Kortikalisgrenze zur Messachse in diesen Fällen kleiner als die Hälfte der am Laminaisthmus bestimmten Breite sein kann, sodass sich im Verlauf eine Unsicherheit in der Bestimmung der passenden Schraubendicke ergibt und mehr Wirbel als instrumentierbar beschrieben werden könnten, als tatsächlich vorliegen.

#### 4.9.3 Voraussetzungen und Einflussfaktoren einer Schraubenplatzierung

Die Schraubenlänge wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt. Durch vorherige Bildgebung und intraoperative Längenmessung ist die optimale Schraubenlänge in der Regel ausreichend bestimmbar. Auch andere Voraussetzungen sowie Einflussfaktoren für die Realisierbarkeit einer Schraube, wie beispielsweise passende Winkel, wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

#### 4.9.4 Anatomische Verhältnisse

In dieser Studie fand keine Erfassung zusätzlicher anatomisch relevanter Parameter wie Größe, Gewicht und Körperbau statt, die einen Einfluss auf die Messwerte haben könnten und zu einer neuen Gruppeneinteilung führen könnten. Die ermittelten Mittelwerte der Messparameter dienen der Orientierung und sind im Einzelfall mit der gebotenen Vorsicht zu verwenden. Üblicherweise sind aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität der HWS-Anatomie individuelle Überlegungen zur Schraubeneinbringung erforderlich.

Einige der aufgeführten Limitationspunkte könnten durch weiterführende Studien reduziert werden. Eine Erhöhung der Fallzahl, ein ggf. prospektives Studienmodell sowie die Erfassung weiterer Parameter könnten dabei sinnvoll sein. Ebenso wären eine Herkunftsanalyse, eine Berücksichtigung des Verlaufes der A. vertebralis und gegebenenfalls eine maschinelle Datenerfassung denkbar. Eine Überprüfung der Möglichkeit der operativen Schraubenplatzierung wäre zudem eine sinnvolle Fortführung dieser Arbeit.

## 5. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie stellt anhand einer Vermessung von CT-Bilddatensätzen statistische Daten der knöchernen Dimensionen der Halswirbelsäule bereit. Schwerpunkt der Arbeit war die Erarbeitung einer standardisierten Messmethode der anatomischen Gegebenheiten der Halswirbelsäule anhand im Rahmen der (Poly-)Traumadiagnostik gewonnener CT-Aufnahmen. Ferner erfolgte eine Analyse verschiedener Möglichkeiten operativer Schraubeneinbringung in den Wirbelbogen (Pedikel-/Laminaschrauben).

Die Ergebnisse der vorliegenden radiologisch anatomischen Studie zeigten eine große Streuung der Messergebnisse (hohe Standardabweichungen) und belegen somit eine hohe interindividuelle Variabilität der knöchernen Strukturen. Daher sollte die Schraubenauswahl und die Festlegung der Operationstechnik für eine Instrumentierung jeweils individualisiert und auf Grundlage der detaillierten präoperativen Planung anhand einer CT-Bildgebung durchgeführt werden. Besonders im Bereich der Halswirbelsäule ist durch die Nähe zu vulnerablen neurovaskulären Strukturen die präoperative Kenntnis der anatomischen Bedingungen wichtig. Die hier dargestellten statistischen Daten sollen der Orientierung für chirurgische Eingriffe an der HWS dienen und durch das standardisierte Messkonzept einen Vergleich mit anderen Wirbelsäulenabschnitten ermöglichen.

Die Studie zeigt, dass männliche Patienten durchschnittlich über größere Lamina- und Pedikeldurchmesser verfügen, sodass sie häufiger die Voraussetzungen für eine Schraubeneinbringung erfüllen. Die Ermittlung der Pedikelhöhe zusätzlich zur Pedikelbreite ist generell zur Planung einer Instrumentierung empfehlenswert, da in einem Teil der Fälle die Pedikelhöhe limitierender Faktor ist. Die Beurteilung, ob eine Laminaschraube platzierbar ist, kann meist anhand der Laminabreite getroffen werden. Patientenalter, Spondylarthroseausprägung oder „Kontinuität“ der C2-Pedikelkortikalis sind keine prädiktiven Faktoren für die Möglichkeit einer Schraubeneinbringung in Lamina oder Pedikel.

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Seitenansicht der Wirbelsäule .....	13
Abbildung 2: Halswirbel von kranial .....	14
Abbildung 3: Median sagittale Darstellung zweier Lendenwirbel und ihrer Bandstrukturen .....	15
Abbildung 4: Erster Halswirbel (Atlas) von kranial.....	17
Abbildung 5: Arteria carotis interna und Vertebralarterien der rechten Halsseite.....	17
Abbildung 6: Zweiter Halswirbel (Axis) von kranial.....	18
Abbildung 7: Zweiter Halswirbel (Axis) von der Seite .....	19
Abbildung 8: Median sagittale Darstellung des Hinterhauptsbeines, der ersten drei Halswirbel und ihrer Bandstrukturen .....	19
Abbildung 9: Halswirbel von der Seite.....	21
Abbildung 10: Positionierung einer Pedikelschraube, schematische Darstellung .....	32
Abbildung 11: Positionierung einer Laminaschraube, schematische Darstellung .....	34
Abbildung 12: Exemplarische Darstellung einer Kortikalisunschärfe in der CT- Bildgebung.....	39
Abbildung 13: HWK 2 - Achsenlage im CT-Bild .....	40
Abbildung 14: Messung Wirbelkörperhöhe mit Dens.....	41
Abbildung 15: Messung Wirbelkörperhöhe ohne Dens .....	41
Abbildung 16: Messung Densbreite koronar .....	42
Abbildung 17: Messung Densbreite sagittal .....	42
Abbildung 18: Bodenplatte - Achsenlage im CT-Bild.....	43
Abbildung 19: Messung Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) .....	44
Abbildung 20: Messung Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) .....	44
Abbildung 21: Lamina - Achsenlage im CT-Bild .....	45
Abbildung 22: Messung Laminalänge .....	46
Abbildung 23: Messung Laminawinkel .....	46
Abbildung 24: Messung Laminabreite (äußere Kortikalis) .....	47
Abbildung 25: Messung Laminabreite (innere Kortikalis) .....	47
Abbildung 26: Messung Laminahöhe (äußere Kortikalis) .....	48
Abbildung 27: Messung Laminahöhe (innere Kortikalis) .....	48

Abbildung 28: Pedikel - Achsenlage im CT-Bild .....	49
Abbildung 29: Messung Pedikellänge .....	50
Abbildung 30: Messung Pedikelwinkel .....	50
Abbildung 31: Messung Pedikelbreite (äußere Kortikalis) .....	51
Abbildung 32: Messung Pedikelbreite (innere Kortikalis) .....	51
Abbildung 33: Messung Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) .....	52
Abbildung 34: Messung Pedikelhöhe (innere Kortikalis) .....	52
Abbildung 35: „kontinuierlicher“ C2-Pedikelkortikalisquerschnitt .....	52
Abbildung 36: „diskontinuierlicher“ C2-Pedikelkortikalisquerschnitt.....	52
Abbildung 37: Massa lateralis - Achsenlage im CT-Bild .....	54
Abbildung 38: Kreisfläche Massa lateralis.....	54
Abbildung 39: Messung Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser) .....	55
Abbildung 40: Messung Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) .....	55
Abbildung 41: Messung Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) .....	56
Abbildung 42: Messung Massa lateralis Höhe .....	56
Abbildung 43: HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild .....	57
Abbildung 44: Messung Wirbelkörperhöhe ventral .....	58
Abbildung 45: Messung Wirbelkörperhöhe zentral .....	58
Abbildung 46: Messung Wirbelkörperhöhe dorsal .....	59
Abbildung 47: Deckplatte HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild.....	60
Abbildung 48: Messung Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser) .....	60
Abbildung 49: Messung Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser) .....	60
Abbildung 50: Wirbelkörper zentral HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild.....	61
Abbildung 51: Messung Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser) .....	62
Abbildung 52: Messung Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) .....	62
Abbildung 53: Pedikel HWK 3 - Achsenlage im CT-Bild.....	63
Abbildung 54: Messung Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) .....	63
Abbildung 55: Messung Pedikelhöhe (innere Kortikalis) .....	63
Abbildung 56: Graphische Darstellung der Altersverteilung des Patientenkollektivs .....	68
Abbildung 57: Mittelwert C2-spezifischer Parameter .....	70
Abbildung 58: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe ventral .....	72
Abbildung 59: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe zentral .....	72

Abbildung 60: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe dorsal .....	72
Abbildung 61: Mittelwert der Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser).....	75
Abbildung 62: Mittelwert der Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser) .....	75
Abbildung 63: Mittelwert der Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser).....	75
Abbildung 64: Mittelwert der Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) ..	75
Abbildung 65: Mittelwert der Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) .....	76
Abbildung 66: Mittelwert der Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) .....	76
Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der Messergebnisse mit signifikantem Seitenunterschied .....	77
Abbildung 68: Mittelwert der Laminallänge .....	80
Abbildung 69: Mittelwert der Laminabreite (äußere Kortikalis) .....	80
Abbildung 70: Mittelwert der Laminabreite (innere Kortikalis).....	81
Abbildung 71: Mittelwert der Laminahöhe (äußere Kortikalis) .....	81
Abbildung 72: Mittelwert der Laminahöhe (innere Kortikalis).....	81
Abbildung 73: Mittelwert der Laminawinkel .....	81
Abbildung 74: Häufigkeitsverteilung der Laminabreiten und -höhen (äußere Kortikalis) C2 bis C7 im Seitenvergleich.....	82
Abbildung 75: Mittelwert der Pedikellänge .....	85
Abbildung 76: Mittelwert der Pedikelbreite (äußere Kortikalis) .....	85
Abbildung 77: Mittelwert der Pedikelbreite (innere Kortikalis).....	86
Abbildung 78: Mittelwert der Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) .....	86
Abbildung 79: Mittelwert der Pedikelhöhe (innere Kortikalis).....	86
Abbildung 80: Mittelwert der Pedikelwinkel .....	86
Abbildung 81: Häufigkeitsverteilung der Pedikelbreiten und -höhen (äußere Kortikalis) C2 bis C7 im Seitenvergleich .....	87
Abbildung 82: Prozentualer Anteil der C2-Pedikel mit „kontinuierlicher“ Kortikalis .....	87
Abbildung 83: Mittelwert der Massa lateralis Fläche .....	90
Abbildung 84: Mittelwert der Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser).....	90
Abbildung 85: Mittelwert der Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) .....	90
Abbildung 86: Mittelwert der Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) .....	90
Abbildung 87: Mittelwert der Massa lateralis Höhe.....	91
Abbildung 88: Spondylarthrose-Index .....	92

Abbildung 89: Chondrose-Index.....	92
Abbildung 90: Sklerose-Index .....	93
Abbildung 91: Spondylose-Index .....	94
Abbildung 92: Retrospondylose-Index .....	94
Abbildung 93: Prozentualer Anteil der Laminae und Pedikel mit kompakter Kortikalis ohne Spongiosakanal .....	96
Abbildung 94: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz .....	99
Abbildung 95: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz.....	100
Abbildung 96: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei „kontinuierlicher“ und „diskontinuierlicher“ Pedikelkortikalis .....	101
Abbildung 97: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz .....	103
Abbildung 98: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz.....	103
Abbildung 99: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz .....	106
Abbildung 100: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz.....	107
Abbildung 101: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz .....	109
Abbildung 102: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz.....	109
Abbildung 103: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Lamina- und/oder Pedikelschrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	110
Abbildung 104: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose .....	112
Abbildung 105: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose .....	113
Abbildung 106: Boxplot der Pedikelbreite und -höhe C2-C7 bei Männern.....	156



Abbildung 107: Boxplot der Pedikelbreite und -höhe C2-C7 bei Frauen.....	156
Abbildung 108: Boxplot der Laminabreite und -höhe C2-C7 bei Männern.....	157
Abbildung 109: Boxplot der Laminabreite und -höhe C2-C7 bei Frauen.....	157

## 7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Messparameter .....	67
Tabelle 2: Altersverteilung Patientenkollektiv .....	68
Tabelle 3: C2-spezifische Parameter .....	69
Tabelle 4: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe ventral mit Standardabweichung .....	71
Tabelle 5: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe zentral mit Standardabweichung .....	71
Tabelle 6: Mittelwert der Wirbelkörperhöhe dorsal mit Standardabweichung .....	71
Tabelle 7: Mittelwert der Deckplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	73
Tabelle 8: Mittelwert der Deckplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	73
Tabelle 9: Mittelwert der Wirbelkörperlänge zentral (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	74
Tabelle 10: Mittelwert der Wirbelkörperbreite zentral (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	74
Tabelle 11: Mittelwert der Bodenplattenlänge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	74
Tabelle 12: Mittelwert der Bodenplattenbreite (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	74
Tabelle 13: Mittelwert der Laminallänge mit Standardabweichung.....	78
Tabelle 14: Mittelwert der Laminabreite (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	79
Tabelle 15: Mittelwert der Laminabreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	79
Tabelle 16: Mittelwert der Laminhöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung	79
Tabelle 17: Mittelwert der Laminhöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichung	79
Tabelle 18: Mittelwert der Laminawinkel mit Standardabweichung .....	80
Tabelle 19: Mittelwert der Pedikellänge mit Standardabweichung.....	84
Tabelle 20: Mittelwert der Pedikelbreite (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	84

Tabelle 21: Mittelwert der Pedikelbreite (innere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	84
Tabelle 22: Mittelwert der Pedikelhöhe (äußere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	84
Tabelle 23: Mittelwert der Pedikelhöhe (innere Kortikalis) mit Standardabweichung .....	85
Tabelle 24: Mittelwert der Pedikelwinkel mit Standardabweichung .....	85
Tabelle 25: Mittelwert der Massa lateralis Fläche mit Standardabweichung.....	88
Tabelle 26: Mittelwert der Massa lateralis Länge (sagittaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	89
Tabelle 27: Mittelwert der Massa lateralis Länge (transversaler Durchmesser) mit Standardabweichung .....	89
Tabelle 28: Mittelwert der Massa lateralis Länge (schräger Durchmesser) mit Standardabweichung .....	89
Tabelle 29: Mittelwert der Massa lateralis Höhe mit Standardabweichung.....	89
Tabelle 30: Prozentualer Anteil der Laminae und Pedikel mit kompakter Kortikalis ohne Spongiosakanal .....	95
Tabelle 31: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz.....	98
Tabelle 32: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen.....	98
Tabelle 33: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen .....	99
Tabelle 34: Prozentualer Anteil der platzierbaren Pedikelschrauben aufgrund einer ausreichenden Breite ohne Berücksichtigung der Höhe mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	99
Tabelle 35: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	102
Tabelle 36: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen .....	102
Tabelle 37: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen.....	102

Tabelle 38: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	105
Tabelle 39: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen .....	105
Tabelle 40: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen.....	105
Tabelle 41: Prozentualer Anteil der platzierbaren Laminaschrauben aufgrund einer ausreichenden Breite ohne Berücksichtigung der Höhe mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	106
Tabelle 42: Prozentualer Anteil der platzierbaren Laminaschrauben aufgrund einer ausreichenden Höhe ohne Berücksichtigung der Breite mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	106
Tabelle 43: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit und ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	108
Tabelle 44: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Altersgruppen .....	108
Tabelle 45: Prozentualer Anteil der platzierbaren 4,0 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz in Alters- und Geschlechtsgruppen.....	108
Tabelle 46: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Schrauben ohne 2 mm Sicherheitstoleranz .....	110
Tabelle 47: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose .....	111
Tabelle 48: Prozentualer Anteil der platzierbaren 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz bei Spondylarthrose .....	112
Tabelle 49: Statistische Daten des Gesamtkollektivs mit Seitentrennung .....	150
Tabelle 50: Statistische Daten des Gesamtkollektivs ohne Seitentrennung .....	153
Tabelle 51: p-Werte des Geschlechtervergleiches.....	155

## 8. Literaturverzeichnis

Abshire BB, McLain RF, Valdevit A, Kambic HE. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out. *Spine J.* 2001, 1:408-414

Abumi K, Ito M, Sudo H. Reconstruction of the subaxial cervical spine using pedicle screw instrumentation. *Spine.* 2012, 37: E349-356

Abumi K, Itoh H, Taneichi H, Kaneda K. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report. *J Spinal Disord.* 1994, 7:19-28

Abumi K, Kaneda K, Shono Y, Fujiya M. One-stage posterior decompression and reconstruction of the cervical spine by using pedicle screw fixation systems. *J Neurosurg.* 1999, 90:19-26

Abumi K, Kaneda K. Pedicle screw fixation for nontraumatic lesions of the cervical spine. *Spine.* 1997, 22:1853-1863

Abumi K, Shono Y, Ito M, Taneichi H, Kotani Y, Kaneda K. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine. *Spine.* 2000, 25:962-969

Ahlborg HG, Johnell O, Turner CH, Rannevik G, Karlsson MK. Bone Loss and Bone Size after Menopause. *N Engl J Med.* 2003, 349:327-334

Allen BL Jr, Ferguson RL, Lehmann TR, O'Brien RP. A mechanistic classification of closed, indirect fractures and dislocations of the lower cervical spine. *Spine.* 1982, 7:1-27

Alvarez N, Rubin L. Atlantoaxial Instability in Adults with Down Syndrome: A Clinical and Radiological Survey. *Appl Res Ment Retard.* 1986, 7:67-78

Antevil JL, Sise MJ, Sack DI, Kidder B, Hopper A, Brown CV. Spiral computed tomography for the initial evaluation of spine trauma: A new standard of care? *J Trauma.* 2006, 61:382-387

AOSpine, 2018. AOSpine Subaxial Classification System. <https://aospine.aofoundation.org/Structure/education/online-education/classifications/Pages/classifications.aspx> (Zugriffsdatum 14.07.2018)

AWMF online, 2020. Evidenzbasierte Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Rheumatologie (DGRh) und der beteiligten medizinisch-wissenschaftlichen Fachgesellschaften und weiterer Organisationen. Langfassung zur S3-Leitlinie Axiale Spondyloarthritis inklusive Morbus Bechterew und Frühformen. [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/060-003I\\_S3\\_Axiale-Spondyloarthritis-Morbus-Bechterew-Fruehformen-2019-10.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/060-003I_S3_Axiale-Spondyloarthritis-Morbus-Bechterew-Fruehformen-2019-10.pdf). (Zugriffsdatum: 29.02.2020)

Bambakidis NC, Feiz-Erfan I, Klopfenstein JD, Sonntag VK. Indications for surgical fusion of the cervical and lumbar motion segment. *Spine*. 2005, 30: S2-6

Bhatnagar R, Yu WD, Bergin PF, Matteini LE, O'Brien JR. The anatomic suitability of the C2 vertebra for intralaminar and pedicular fixation: a computed tomography study. *Spine J*. 2010, 10:896-899

Bogduk N. Functional anatomy of the spine. *Handb Clin Neurol*. 2016. 136: 675-688

Bolm-Audorff U, Brandenburg S, Brüning T, Dupuis H, Ellegast R, Elsner G, Franz K, Grasshoff H, Grosser V, Hanisch L, Hartmann B, Hartung E, Heuchert G, Jäger M, Krämer J, Kranig A, Hering KG, Ludolph E, Luttmann A, Nienhaus A, Pieper W, Pöhl KD, Remé T. Medizinische Beurteilungskriterien zu bandscheibenbedingten Berufskrankheiten der Lendenwirbelsäule. *Trauma Berufskrankh*. 2005, 7:211-252

Bozbuga M, Ozturk A, Ari Z, Sahinoglu K, Bayraktar B, Cecen A. Morphometric evaluation of subaxial cervical vertebrae for surgical application of transpedicular screw fixation. *Spine*. 2004, 29:1876-1880

Brandt MM, Wahl WL, Yeom K, Kazerooni E, Wang SC. Computed tomographic scanning reduces cost and time of complete spine evaluation. *J Trauma*. 2004, 56:1022-6;1026-1028

Bransford RJ, Lee MJ, Reis A. Posterior fixation of the upper cervical spine: contemporary techniques. *J Am Acad Orthop Surg*. 2011, 19:63-71

Burger H, Van Daele PLA, Grashuis K, Hofman A, Grobbee DE, Schütte HE, Birkenhäger JC, Pols HAP. Vertebral Deformities and Functional Impairment in Men and Women. *J Bone Miner Res*. 1997, 12:152-157

Burke JP, Gerszten PC, Welch WC. Iatrogenic vertebral artery injury during anterior cervical spine surgery. *Spine J.* 2005, 5:508-514

Chanplakorn P, Kraiwattanapong C, Aroonjarattham K, Leelapattana P, Keorochana G, Jaovisidha S, Wajanavisit W. Morphometric evaluation of subaxial cervical spine using multi-detector computerized tomography (MD-CT) scan: The consideration for cervical pedicle screws fixation. *BMC Musculoskelet Disord.* 2014, 15:125

Chao CK, Hsu CC, Wang JL, Lin J. Increasing bending strength and pullout strength in conical pedicle screws: biomechanical tests and finite element analyses. *J Spinal Disord Tech.* 2008, 21:130-138

Chazono M, Tanaka T, Kumagae Y, Sai T, Marumo K. Ethnic differences in pedicle and bony spinal canal dimensions calculated from computed tomography of the cervical spine: a review of the English-language literature. *Eur Spine J.* 2012, 21: 1451-1458

Clarke MJ, Cohen-Gadol AA, Ebersold MJ, Cabanela ME. Long-term incidence of subaxial cervical spine instability following cervical arthrodesis surgery in patients with rheumatoid arthritis. *Surg Neurol.* 2006, 66:136-140

Coleman RE. Skeletal complications of malignancy. *Cancer.* 1997, 80:1588-1594

Côté P, Cassidy JD, Carroll L. The Saskatchewan Health and Back Pain Survey. The prevalence of neck pain and related disability in Saskatchewan adults. *Spine.* 1998, 23:1689-1698

Cryer PC, Davidson L, Styles CP, Langley JD. Descriptive epidemiology of injury in the south east: identifying priorities for action. *Public Health.* 1996, 110:331-338

Davis JW, Phreaner DL, Hoyt DB, Mackersie RC. The etiology of missed cervical spine injuries. *J Trauma.* 1993, 34:342-346

DePuySynthes, 2017 USS II - Surgical Technique - German. <http://emea.depuysynthes.com/?pmid=c0a802551715673355a813f0ccfc2751&search=pedikelschraube&page=0&rpp=12>. (Zugriffsdatum: 21.05.2017)

Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie, 2017. Polytrauma. <http://www.dgu-online.de/en/patienteninformation/haeufige-diagnosen/schwerverletzte/polytrauma.html>. (Zugriffsdatum: 27.04.2019)

Devereaux MW, Anatomy and examination of the spine. *Neurol Clin.* 2007, 25:331-351

Du S, Ni B, Lu X, Xie N, Guo X, Guo Q, Yang J, Chen F. Application of Unilateral C2 Translaminar Screw in the Treatment for Atlantoaxial Instability as an Alternative or Salvage of Pedicle Screw Fixation. *World Neurosurg.* 2017, 97:86-92

Ebraheim NA, Lu J, Biyani A, Brown JA, Yeasting RA. Anatomic considerations for uncovertebral involvement in cervical spondylosis. *Clin Orthop Relat Res.* 1197, 334:200-206

Ethanium Klinik Heidelberg. Pedikelschraube: Chirurgisches Instrument zur Stabilisierung der Wirbelsäule. <https://ethanium-klinik-heidelberg.de/glossar/41-Pedikelschraube.html>. (Zugriffsdatum: 27.04.2019)

Fredø H L, Rizvi S A M, Lied B, Rønning P, Helsetz E. The epidemiology of traumatic cervical spine fractures: a prospective population study from Norway. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2012, 20:85

George DC, Krag MH, Johnson CC, Van Hal ME, Haugh LD, Grobler LJ. Hole preparation techniques for transpedicle screws. Effect on pull-out strength from human cadaveric vertebrae. *Spine.* 1991, 16:181-184

Gillespie KA, Dickey JP. Biomechanical role of lumbar spine ligaments in flexion and extension: determination using a parallel linkage robot and a porcine model. *Spine.* 2004. 29: 1208-1216

Goldberg W, Mueller C, Panacek E, Tigges S, Hoffman JR, Mower WR. Distribution and patterns of blunt traumatic cervical spine injury. *Annals of Emergency Medicine.* 2001, 38:17-21

Grass R, Biewener A, Dickopf A, Rammelt S, Heineck J, Zwipp H. Percutaneous dorsal versus open instrumentation for fractures of the thoracolumbal border. A comparative, prospective study. *Unfallchirurg.* 2006, 109:297-305



- Grogan EL, Morris JA Jr, Dittus RS, Moore DE, Poulouse BK, Diaz JJ, Speroff T. Cervical spine evaluation in urban trauma centers: lowering institutional costs and complications through helical CT scan. *J Am Coll Surg*. 2005, 200:160-165
- Gupta P, Kumar A, Gamangatti S. Mechanism and patterns of cervical spine fractures-dislocations in vertebral artery injury. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2012, 3:11-15
- Hacker AG, Molloy S, Bernard J. The contralateral lamina: a reliable guide in subaxial, cervical pedicle screw placement. *Eur Spine J*. 2008, 17:1457-1461
- Hadra BE. Wiring of the Vertebrae as a Means of Immobilization in Fracture and Potts' Disease. 1891. *Clin Orthop Relat Res*. 2007, 460:11-3
- Halvorson TL, Kelley LA, Thomas KA, Whitecloud TS, Cook SD. Effects of bone mineral density on pedicle screw fixation. *Spine*. 1994, 19:2415-2420
- Henne-Bruns D, Kremer B, Dürig M. *Duale Reihe Chirurgie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2008. S.818-824
- Herold G und Mitarbeiter. *Innere Medizin*. Köln: Herold G, 2013. S. 659
- Herren C, Jung N, Pishnamaz M, Breuninger M, Siewe J, Sobottke R. Spondylodiscitis: Diagnosis and treatment options - a systematic review. *Dtsch Arztebl Int*. 2017, 114: 875-882
- Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE, Uchiyama S, Hara T, Washio T, Sugiura T, Yokaichiya M, Ikeda M. Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability. *Spine*. 1997, 22:2504-2510
- Institute of Medicine (US) Committee on the Long-Run Macroeconomic Effects of the Aging U.S. Population. *Aging and the Macroeconomy: Long-Term Implications of an Older Population*. Washington (DC): National Academies Press (US), 2012
- Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, Matsumoto A, Ito Z, Tauchi R, Muramoto A, Ohno S, Nishimura Y. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image (O-arm)-based navigation system for cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg Spine*. 2011, 15:472-478

Ismail AA, Cooper C, Felsenberg D, Varlow J, Kanis JA, Silman AJ, O'Neill TW. Number and type of vertebral deformities: epidemiological characteristics and relation to back pain and height loss. European Vertebral Osteoporosis Study Group. *Osteoporos Int.* 1999, 9:206-213

Jang WY, Kim IS, Lee HJ, Sung JH, Lee SW, Hong JT. A Computed Tomography-Based Anatomic Comparison of Three Different Types of C7 Posterior Fixation Techniques: Pedicle, Intralaminar, and Lateral Mass Screws. *J Korean Neurosurg Soc.* 2011, 50: 166-172

Ji GY, Oh CH, Park SH, Kurniawan F, Lee J, Jeon JK, Shin DA, Kim KN. Feasibility of Translaminar Screw Placement in Korean Population: Morphometric Analysis of Cervical Spine. *Yonsei Med J.* 2015, 56: 159-166

Jo AS, Wilseck Z, Manganaro MS, Ibrahim M. Essentials of Spine Trauma Imaging: Radiographs, CT and MRI. *Semin Ultrasound CT MR.* 2018, 39:532-550

John D. Koerner, MD, Christopher K. Kepler, MD, MBA, Albert T.J. Revision Surgery for Failed Cervical Spine Reconstruction. *HSS J.* 2015, 11: 2-8

Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M, Higashiyama N, Takabatake M, Mizoi K. A novel screw guiding method with a screw guide template system for posterior C-2 fixation: clinical article. *J Neurosurg Spine.* 2014, 21:231-238

Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M. Safe and accurate midcervical pedicle screw insertion procedure with the patient-specific screw guide template system. *Spine.* 2015, 40:E341-348

Karaikevic EE, Daubs MD, Madsen RW, Gaines RW Jr. Morphologic characteristics of human cervical pedicles. *Spine.* 1997, 22:493-500

Kawaguchi Y, Nakano M, Yasuda T, Seki S, Hori T, Kimura T. Development of a new technique for pedicle screw and Magerl screw insertion using a 3-dimensional image guide. *Spine.* 2012, 37:1983-1988

- Keskin F, Erdi F, Nayman A, Babaoglu O, Erdal K, Ozer AF. Radiological anatomy of the C7 vertebra: Clinical implications in spine surgery. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2015, 6: 30-35
- Khosla S. Pathogenesis of Osteoporosis. *Transl Endocrinol Metab*. 2014, 1:55-86
- Kim MY, Im SW, Park HM. The Demographic Changes of Menopausal and Geripausal Women in Korea. *J Bone Metab*. 2015, 22:23-28
- Koller H, Hempfing A, Acosta F, Fox M, Scheiter A, Tauber M, Holz U, Resch H, Hitzl W. Cervical anterior transpedicular screw fixation. Part I: Study on morphological feasibility, indications, and technical prerequisites. *Eur Spine J*. 2008, 17: 523-538
- Krenn MH, Piotrowski WP, Penzkofer R, Augat P. Influence of thread design on pedicle screw fixation. Laboratory investigation. *J Neurosurg Spine*. 2008, 9:90-95
- Kusumi K. *The Genetics and Development of Scoliosis*. New York: Springer-Verlag, 2010. S. 28-29
- Lane NE. Epidemiology, etiology, and diagnosis of osteoporosis. *Am J Obstet Gynecol*. 2006, 194: 3-11
- Ligamenta, Ligamenta Wagner & Sabljic Wirbelsäulenzentrum, 2017. Klassifikationen HWS Verletzungen. <http://www.ligamenta.de/halswirbelsaeule-verletzungen.html>. (Zugriffsdatum: 24.04.2019).
- Liu J, Napolitano JT, Ebraheim NA. Systematic review of cervical pedicle dimensions and projections. *Spine*. 2010, 35: E1373-1380
- Liu YJ, Tian W, Liu B, Li Q, Hu L, Li ZY, Yuan Q, Lü YW, Sun YZ. Comparison of the clinical accuracy of cervical (C2-C7) pedicle screw insertion assisted by fluoroscopy, computed tomography-based navigation, and intraoperative three-dimensional C-arm navigation. *Chin Med J (Engl)*. 2010, 123:2995-2998
- Loder RT. The sagittal profile of the cervical and lumbosacral spine in Scheuermann thoracic kyphosis. *J Spinal Disord*. 2001, 14: 226-231

Lötters FJB, van den Bergh JP, de Vries F, Rutten-van Mölken MPMH. Current and Future Incidence and Costs of Osteoporosis-Related Fractures in The Netherlands: Combining Claims Data with BMD Measurements. *Calcif Tissue Int.* 2016, 98: 235-243

Lowery DW, Wald MM, Browne BJ, Tigges S, Hoffmann JR, Mower WR. Epidemiology of Cervical Spine Injury Victims. *Ann Emerg Med.* 2001, 38:12-16

Manton, KG. Demographic trends for the aging female population. *J Am Med Womens Assoc (1972).* 1997, 52:99-105

Mason A, Paulsen R, Babuska JM, Rajpal S, Burneikiene S, Nelson EL, Villavicencio AT. The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems. *J Neurosurg Spine.* 2014, 20:196-203

Mercer SR, Bogduk N. Joints of the cervical vertebral column. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001. 31: 174-182

Miyamoto H, Uno K. Cervical pedicle screw insertion using a computed tomography cutout technique. *J Neurosurg Spine.* 2009, 11:681-687

Mitchell LE, Adzick NS, Melchionne J, Pasquariello PS, Sutton LN, Whitehead AS. Spina bifida. *Lancet.* 2004, 364:1885-1895

Moore TA, Vaccaro AR, Anderson PA. Classification of Lower Cervical Spine Injuries. *Spine.* 2006, 31:37-43

Morales-Avalos R, Leyva-Villegas J, Sánchez-Mejorada G, Cárdenas-Serna M, Vílchez-Cavazos F, Martínez-Ponce De León A, Elizondo-Riojas G, Martínez-García J, De La Garza-Castro O, Elizondo-Omaña R, Guzmán-López S. Age- and gender-related variations in morphometric characteristics of thoracic spine pedicle: A study of 4,800 pedicles. *Clin Anat.* 2014, 27:441-450

Munusamy T, Thien A, Anthony MG, Bakthavachalam R, Dinesh SK. Computed tomographic morphometric analysis of cervical pedicles in a multi-ethnic Asian population and relevance to subaxial cervical pedicle screw fixation. *Eur Spine J.* 2015, 24:120-126

Münzenberg KJ. Orthopädie in der Praxis. Zweite, vollständig überarbeitete Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1988

Muslim KA, Rahyussalim, Yulisa ND. Influence of Gender on Thoracic Pedicle Morphometry. *The Journal of Indonesian Orthopaedic*. 2011, 39:110-112

Nakashima H, Yukawa Y, Imagama S, Kanemura T, Kamiya M, Yanase M, Ito K, Machino M, Yoshida G, Ishikawa Y, Matsuyama Y, Ishiguro N, Kato F. Complications of cervical pedicle screw fixation for nontraumatic lesions: a multicenter study of 84 patients. *J Neurosurg Spine*. 2012, 16:238-247

Nicholson PH, Haddaway MJ, Davie MW, Evans SF. Vertebral deformity, bone mineral density, back pain and height loss in unscreened women over 50 years. *Osteoporos Int*. 1993, 3:300-307

Niethard FU, Weber M, Heller KD. Orthopädie compact. Alles für Station und Facharztprüfung. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2005. S. 7, 31-46, 98

Okuyama K, Sato K, Abe E, Inaba H, Shimada Y, Murai H. Stability of transpedicle screwing for the osteoporotic spine. An in vitro study of the mechanical stability. *Spine*. 1993, 18:2240-2245

Onibokun A, Khoo LT, Bistazzoni S, Chen NF, Sassi M. Anatomical considerations for cervical pedicle screw insertion: the use of multiplanar computerized tomography measurements in 122 consecutive clinical cases. *Spine J*. 2009, 9:729-734

Panjabi MM, Shin EK, Chen NC, Wang JL. Internal morphology of human cervical pedicles. *Spine*. 2000, 25:1197-1205

Patwardhan AR, Nemade PS, Bhosale SK, Srivastava SK. Computed tomography-based morphometric analysis of cervical pedicles in Indian population: a pilot study to assess feasibility of transpedicular screw fixation. *J Postgrad Med*. 2012, 58:119-122

Peng CW, Chou BT, Bendo JA, Spivak JM. Vertebral artery injury in cervical spine surgery: anatomical considerations, management, and preventive measures. *Spine J*. 2009, 9:70-76

Pfeiffer M, Gilbertson LG, Goel VK, Griss P, Keller JC, Ryken TC, Hoffman HE. Effect of specimen fixation method on pullout tests of pedicle screws. *Spine*. 1996, 21:1037-1044

Rajasekaran S, Kanna PR, Shetty TA. Intra-operative computer navigation guided cervical pedicle screw insertion in thirty-three complex cervical spine deformities. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2010, 1:38-43

Reinhold M, Knop C, Kneitz C, Disch A. Spine Fractures in Ankylosing Diseases: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*. 2018. 8:56S-68S

Rihn JA, Harrod C, Albert TJ. Revision cervical spine surgery. *Orthop Clin North Am*. 2012, 43:123-136

Roy-Camille R, Saillant G, Berteaux D, Salgado V. Osteosynthesis of thoraco-lumbar spine fractures with metal plates screwed through the vertebral pedicles. *Reconstr Surg Traumatol*. 1976, 15:2-16

Ruff CB, Hayes WC. Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *J Orthop Res*. 1988, 6:886-896

Ruland CM, McAfee PC, Warden KE, Cunningham BW. Triangulation of pedicular instrumentation. A biomechanical analysis. *Spine*. 1991, 16: 270-276

Saetia K, Phankhongsab A. C2 Anatomy for Translaminar Screw Placement Based on Computerized Tomographic Measurements. *Asian Spine J*. 2015, 9: 205-209

Saluja S, Patil S, Vasudeva N. Morphometric Analysis of Sub-axial Cervical Vertebrae and Its Surgical Implications. *J Clin Diagn Res*. 2015, 9: AC01-AC04

Sanchez B, Waxman K, Jones T, Conner S, Chung R, Becerra S. Cervical spine clearance in blunt trauma: evaluation of a computed tomography-based protocol. *J Trauma*. 2005, 59:179-183

Schiebler TH, Schmidt W, Arnold G, Beier HM, Herrmann M, Kretschmann HJ, Kühnel W, Rollhäuser H, Winckler J, van der Zypen E. *Lehrbuch der gesamten Anatomie des*

Menschen: Cytologie, Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1983. S. 106

Schroeder GD, Hsu WK. Vertebral artery injuries in cervical spine surgery. *Surg Neurol Int.* 2013, 4(Suppl 5): 362-367

Sorrenti L, Iamaguchi MM, Sposeto RB, de Araújo MP, Iutaka AS, de Barros Filho TEP, da Rocha ID. Posterior instrumentation for laminar screw of C2: a dimensional anatomic study of axis. *Acta ortop. bras.* 2009, 17:219-223

Soshi S, Shiba R, Kondo H, Murota K. An experimental study on transpedicular screw fixation in relation to osteoporosis of the lumbar spine. *Spine.* 1991, 16:1335-1341

Spine Universe, 2020. Spinal Fractures: The Three Column Concept. <https://www.spineuniverse.com/conditions/spinal-fractures/spinal-fractures-three-column-concept>. (Zugriffsdatum: 07.02.2020)

Statistisches Bundesamt, 2017. Bevölkerungsvorausberechnung. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Bevoelkerungsvorausberechnung.html>. (Zugriffsdatum: 27.04.2019)

Stemper BD, DeRosia JJ, Yoganandan N, Pintar FA. Gender dependent cervical spine anatomical differences in size-matched volunteers. *Biomedical sciences instrumentation.* 2009, 45:149-154

Sunar M, Kapakin S. Morphometric Evaluation of Craniocervical Junction by Magnetic Resonance Imaging Method. *Asian J Neurosurg.* 2019. 14: 702-709

Tan SH, Teo EC, Chua HC. Quantitative three-dimensional anatomy of cervical, thoracic and lumbar vertebrae of Chinese Singaporeans. *Eur Spine J.* 2004, 13: 137-146

Töndury G. Embryonale und postnatale Entwicklung der Wirbelsäule. In: Diethelm L. *Handbuch der Medizinischen Radiologie.* Heidelberg: Springer Verlag, 1974. S.15

Torretti JA, Sengupta DK. Cervical spine trauma. *Indian J Orthop.* 2007, 41:255-267

- Tóth E. Vertebral deformities and the underlying diseases. *Orv Hetil.* 2003, 144:1955-1963
- Uğur HC, Attar A, Uz A, Tekdemir I, Egemen N, Cağlar S, Genç Y. Surgical anatomic evaluation of the cervical pedicle and adjacent neural structures. *Neurosurgery.* 2000, 47:1162-1169
- Vasavada AN, Danaraj J, Siegmund GP. Head and neck anthropometry, vertebral geometry and neck strength in height-matched men and women. *J Biomech.* 2008, 41:114-121
- Wang H, Xiang Q, Li Ch, Zhou Y. Epidemiology of Traumatic Cervical Spinal Fractures and Risk Factors for Traumatic Cervical Spinal Cord Injury in China. *Journal of spinal disorders & techniques.* 2013, 26
- Wang Z, Leng J, Liu J, Liu Y. Morphological study of the posterior osseous structures of subaxial cervical spine in a population from northeastern China. *J Orthop Surg Res.* 2015, 10: 53
- Wasinpongwanich K, Paholpak P, Tuamsuk P, Sirichativapee W, Wisanuyotin T, Kosuwon W, Jeeravipoolvarn P. Morphological Study of Subaxial Cervical Pedicles by Using Three-Dimensional Computed Tomography Reconstruction Image. *Neurol Med Chir.* 2014, 54: 736-745
- Waxenbaum JA, Futterman B. *Anatomy, Back, Lumbar Vertebrae.* Stat Pearls. 2018.
- Wheless CR. *Wheless Textbook of Orthopaedics, 2011. Anatomy of the Axis.* [http://www.whelessonline.com/ortho/anatomy\\_of\\_the\\_axis](http://www.whelessonline.com/ortho/anatomy_of_the_axis). (Zugriffsdatum: 27.04.2019)
- Wright NM, Laurysen C. Vertebral artery injury in C1-2 transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves. *American Association of Neurological Surgeons/Congress of Neurological Surgeons. J Neurosurg.* 1998, 88:634-640
- Xu R, Ebraheim NA, Yeasting R, Wong F, Jackson WT. Anatomy of C7 lateral mass and projection of pedicle axis on its posterior aspect. *J Spinal Disord.* 1995, 8: 116-120



Yu CC, Bajwa NS, Toy JO, Ahn UM, Ahn NU. Pedicle morphometry of upper thoracic vertebrae: an anatomic study of 503 cadaveric specimens. *Spine*. 2014, 39:E1201-1209

Yu CC, Yuh RT, Bajwa NS, Toy JO, Ahn UM, Ahn NU. Pedicle Morphometry of Lumbar Vertebrae: Male, Taller, and Heavier Specimens Have Bigger Pedicles. *Spine*. 2015, 40:1639-1646

Yukawa Y1, Kato F, Ito K, Horie Y, Hida T, Nakashima H, Machino M. Placement and complications of cervical pedicle screws in 144 cervical trauma patients using pedicle axis view techniques by fluoroscope. *Eur Spine J*. 2009, 18:1293-1299

Yurube T, Sumi M, Nishida K, Miyamoto H, Kohyama K, Matsubara T, Miura Y, Sugiyama D, Doita M. Incidence and aggravation of cervical spine instabilities in rheumatoid arthritis: a prospective minimum 5-year follow-up study of patients initially without cervical involvement. *Spine*. 2012, 37:2136-2144

Yusof MI, Ming LK, Abdullah MS, Yusof AH. Computerized Tomographic Measurement of the Cervical Pedicles Diameter in a Malaysian Population and the Feasibility for Transpedicular Fixation. *Spine*. 2006, 31:E221-224

Yusof MI, Shamsi, SS. Translaminar screw fixation of the cervical spine in Asian population: feasibility and safety consideration based on computerized tomographic measurements. *Surg Radiol Anat*. 2012, 34: 203-207

Zhuang Z, Chen Y, Han H, Cai S, Wang X, Qi W, Kong K. Thoracic pedicle morphometry in different body height population: a three-dimensional study using reformatted computed tomography. *Spine*. 2011, 36:E1547-1554

**Tab. 49:** Statistische Daten des Gesamtkollektivs mit Seitentrennung; n: Anzahl Messwerte, mean: Mittelwert, sd: Standard-abweichung, med: Median, min: minimaler Messwert, max: maximaler Messwert, se: Standardfehler, Werte linearer Messungen in mm, Winkel in Grad, Flächen in mm<sup>2</sup>, Pedikelkortikaliseinheit 1: „kontinuierlich“, 0: „diskontinuierlich“

Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se
C2HmD	159	41,01	3,25	40,66	33,94	50,87	0,26	C3WLzs	161	15,69	1,79	15,62	10,66	20,10	0,14	C5LLI	159	33,37	4,55	32,27	25,73	53,67	0,36
C2HoD	160	23,30	1,96	23,34	18,78	28,80	0,15	C4WLzs	161	15,52	1,92	15,64	11,21	20,87	0,15	C6LLr	160	31,82	4,19	31,23	23,83	45,38	0,33
C2DBk	160	12,81	1,89	13,00	7,77	18,17	0,15	C5WLzs	160	15,50	2,13	15,41	11,06	21,65	0,17	C6LLI	161	30,41	4,79	29,65	22,84	44,28	0,38
C2DBs	161	10,89	0,92	10,85	7,54	14,09	0,07	C6WLzs	160	16,70	2,46	16,48	11,03	30,37	0,19	C7LLr	161	35,12	7,36	33,53	23,68	52,89	0,58
C3WHv	161	14,60	1,57	14,44	10,46	18,68	0,12	C7WLzs	160	17,03	2,37	16,81	11,74	25,20	0,19	C7LLI	161	32,94	7,01	30,86	22,79	57,16	0,55
C4WHv	161	14,00	1,50	13,82	10,58	18,09	0,12	C3WBzt	161	24,44	1,86	24,38	18,54	30,49	0,15	C2LBrka	161	5,37	1,27	5,34	1,90	9,14	0,10
C5WHv	159	13,55	1,46	13,42	10,37	17,82	0,12	C4WBzt	161	25,06	1,96	25,13	19,50	30,08	0,15	C2LBlka	161	5,76	1,26	5,81	1,91	9,15	0,10
C6WHv	159	13,50	1,45	13,47	9,34	17,66	0,11	C5WBzt	160	26,97	2,14	27,05	20,82	32,13	0,17	C3LBrka	160	2,99	0,88	2,96	0,96	5,08	0,07
C7WHv	158	14,75	1,52	14,68	11,03	18,63	0,12	C6WBzt	160	28,73	2,46	28,63	15,87	35,09	0,19	C3LBlka	161	3,15	0,82	3,11	1,11	5,50	0,06
C3WHz	161	11,87	1,43	11,74	7,94	17,09	0,11	C7WBzt	160	31,72	2,73	31,78	22,59	37,23	0,22	C4LBrka	160	2,35	0,75	2,36	0,82	5,05	0,06
C4WHz	161	11,42	1,29	11,33	8,23	15,20	0,10	C2BLs	161	16,05	1,66	16,05	12,46	20,35	0,13	C4LBlka	160	2,40	0,70	2,38	0,77	5,14	0,06
C5WHz	159	11,16	1,33	10,99	7,69	15,30	0,11	C3BLs	161	16,01	1,77	16,01	12,21	21,25	0,14	C5LBrka	159	2,07	0,66	2,04	0,48	3,82	0,05
C6WHz	159	11,30	1,44	11,22	7,89	15,53	0,11	C4BLs	161	16,09	1,83	16,23	12,11	23,44	0,14	C5LBlka	159	2,10	0,65	2,06	0,84	3,95	0,05
C7WHz	158	12,85	1,51	12,77	9,90	17,65	0,12	C5BLs	160	17,04	2,38	16,91	12,10	27,86	0,19	C6LBrka	160	2,60	0,68	2,52	1,08	4,29	0,05
C3WHd	160	14,47	1,42	14,37	11,09	18,92	0,11	C6BLs	159	17,97	2,63	17,70	12,79	27,82	0,21	C6LBlka	161	2,53	0,75	2,52	0,34	4,47	0,06
C4WHd	161	13,91	1,29	13,77	10,17	17,12	0,10	C7BLs	159	17,88	2,46	17,66	12,50	27,61	0,20	C7LBrka	161	4,35	0,95	4,25	2,34	7,36	0,08
C5WHd	160	13,71	1,34	13,61	9,82	17,13	0,11	C2BBt	161	16,98	1,92	16,94	12,41	22,44	0,15	C7LBlka	161	4,43	0,99	4,40	1,83	7,42	0,08
C6WHd	159	13,57	1,35	13,70	9,31	17,90	0,11	C3BBt	161	18,08	2,08	18,09	13,42	23,81	0,16	C2LBrki	161	3,01	1,33	3,10	0,00	7,16	0,11
C7WHd	158	15,16	1,46	15,14	11,75	18,89	0,12	C4BBt	161	18,98	2,26	18,75	14,43	29,70	0,18	C2LBlki	161	3,36	1,31	3,48	0,00	6,91	0,10
C3DLs	161	14,12	1,69	14,08	10,56	19,22	0,13	C5BBt	160	20,23	2,35	19,98	15,52	30,30	0,19	C3LBrki	160	1,24	0,87	1,17	0,00	3,65	0,07
C4DLs	161	14,13	1,78	13,98	9,99	19,90	0,14	C6BBt	159	23,99	2,87	23,68	16,95	33,14	0,23	C3LBlki	161	1,56	2,47	1,36	0,00	30,77	0,19
C5DLs	160	14,33	1,89	14,11	10,25	19,85	0,15	C7BBt	159	27,95	2,66	27,94	17,01	34,43	0,21	C4LBrki	160	0,81	0,88	0,74	0,00	7,60	0,07
C6DLs	160	15,83	2,26	15,55	10,20	23,53	0,18	C2LLr	161	33,92	2,83	33,82	26,34	40,85	0,22	C4LBlki	160	0,73	0,71	0,70	0,00	3,71	0,06
C7DLs	159	17,47	2,68	17,28	11,95	30,80	0,21	C2LLI	161	33,33	2,98	33,03	25,34	42,49	0,23	C5LBrki	159	0,57	0,59	0,47	0,00	2,13	0,05
C3DBt	161	25,62	1,81	25,66	19,07	30,38	0,14	C3LLr	160	33,75	3,14	33,76	24,67	41,40	0,25	C5LBlki	159	0,55	0,60	0,44	0,00	2,73	0,05
C4DBt	161	25,80	1,93	25,86	19,52	30,67	0,15	C3LLI	161	33,09	3,42	32,99	22,89	41,41	0,27	C6LBrki	160	0,99	0,67	1,02	0,00	2,92	0,05
C5DBt	160	26,93	1,88	26,85	19,64	31,72	0,15	C4LLr	160	34,26	3,53	34,32	25,59	49,64	0,28	C6LBlki	161	1,01	0,69	1,01	0,00	2,67	0,05
C6DBt	160	28,16	2,17	27,98	20,78	33,36	0,17	C4LLI	160	33,68	3,91	33,66	25,28	47,49	0,31	C7LBrki	161	2,45	0,93	2,44	0,42	5,64	0,07
C7DBt	159	31,47	2,53	31,58	15,57	37,45	0,20	C5LLr	159	33,77	4,14	33,58	24,63	49,05	0,33	C7LBlki	161	2,50	0,93	2,51	0,00	5,75	0,07

Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se
C2LHrka	161	12,16	1,63	12,02	7,51	16,64	0,13	C4LWl	160	38	4,28	38,42	25,96	50,95	0,34	C7PBrka	161	6,47	1,07	6,51	4,30	10,81	0,08
C2LHlka	161	11,98	1,64	11,97	8,29	16,49	0,13	C5LWr	159	37	4,13	37,70	22,00	48,89	0,33	C7PBlka	161	6,34	1,04	6,37	3,34	9,66	0,08
C3LHrka	160	11,10	1,60	11,23	6,72	16,19	0,13	C5LWl	159	38	4,29	38,20	27,87	49,90	0,34	C2PBrki	160	3,96	1,76	4,06	0,00	8,54	0,14
C3LHlka	161	11,26	1,47	11,19	7,95	15,13	0,12	C6LWr	160	37	3,87	36,73	25,76	46,71	0,31	C2PBlki	161	4,06	1,81	4,00	0,00	8,50	0,14
C4LHrka	160	11,03	1,68	10,98	5,46	14,80	0,13	C6LWl	161	38	4,12	38,00	27,86	48,62	0,32	C3PBrki	161	1,90	1,11	1,99	0,00	4,41	0,09
C4LHlka	160	10,91	1,62	10,77	5,84	14,42	0,13	C7LWr	161	35	4,02	35,44	22,03	47,16	0,32	C3PBlki	161	1,73	1,07	1,72	0,00	4,84	0,08
C5LHrka	159	11,54	1,76	11,44	7,99	16,64	0,14	C7LWl	161	35	4,33	35,46	18,33	46,50	0,34	C4PBrki	161	1,99	1,12	1,93	0,00	4,76	0,09
C5LHlka	159	11,33	1,61	11,33	6,82	18,10	0,13	C2PLr	160	27,27	3,42	27,18	18,51	44,32	0,27	C4PBlki	161	1,77	1,13	1,68	0,00	4,60	0,09
C6LHrka	160	12,78	1,92	12,68	8,10	18,91	0,15	C2PLl	160	27,32	3,10	27,30	18,98	36,91	0,25	C5PBrki	159	2,18	1,37	2,34	0,00	5,31	0,11
C6LHlka	161	12,60	2,25	12,62	1,82	18,13	0,18	C3PLr	161	31,59	3,45	31,95	21,44	43,05	0,27	C5PBlki	159	2,17	1,32	2,14	0,00	5,70	0,10
C7LHrka	160	16,23	1,80	16,26	11,61	22,70	0,14	C3PLl	161	32,37	3,54	32,53	21,39	42,08	0,28	C6PBrki	161	2,73	1,27	2,83	0,00	6,03	0,10
C7LHlka	160	16,13	2,01	16,02	10,70	22,66	0,16	C4PLr	161	33,55	3,39	33,77	20,29	45,55	0,27	C6PBlki	161	2,50	1,36	2,72	0,00	5,93	0,11
C2LHrki	161	7,92	2,51	8,17	0,00	13,82	0,20	C4PLl	161	33,99	3,19	34,11	23,34	43,02	0,25	C7PBrki	161	4,03	1,23	4,02	0,00	8,07	0,10
C2LHlki	161	8,16	2,17	8,29	0,00	14,82	0,17	C5PLr	159	34,54	3,15	34,16	22,34	48,39	0,25	C7PBlki	161	3,90	1,18	3,94	0,33	6,93	0,09
C3LHrki	160	5,38	2,84	5,72	0,00	12,07	0,22	C5PLl	159	34,64	3,27	34,41	26,07	47,20	0,26	C2PHrka	160	10,00	1,60	9,87	5,56	23,00	0,13
C3LHlki	161	5,63	2,74	6,23	0,00	12,81	0,22	C6PLr	161	34,11	3,48	33,88	23,31	44,36	0,27	C2PHlka	161	10,13	1,21	10,04	7,47	17,50	0,09
C4LHrki	160	4,42	3,28	5,09	0,00	12,79	0,26	C6PLl	161	34,28	3,93	33,98	24,67	50,31	0,31	C3PHrka	161	6,55	1,07	6,50	2,42	9,65	0,08
C4LHlki	160	4,02	3,20	4,46	0,00	11,48	0,25	C7PLr	160	30,75	3,54	30,73	21,68	42,16	0,28	C3PHlka	161	6,55	1,08	6,38	3,55	9,04	0,09
C5LHrki	159	4,34	3,49	4,78	0,00	14,27	0,28	C7PLl	160	30,73	3,53	30,50	22,33	41,45	0,28	C4PHrka	161	6,70	1,16	6,62	2,94	9,36	0,09
C5LHlki	159	3,90	3,56	3,33	0,00	12,73	0,28	C2PBrka	160	6,80	2,05	6,80	1,88	11,88	0,16	C4PHlka	161	6,81	1,28	6,71	0,52	10,53	0,10
C6LHrki	160	7,13	3,64	7,83	0,00	16,35	0,29	C2PBlka	161	7,06	2,00	7,11	0,61	10,84	0,16	C5PHrka	159	6,25	1,12	6,05	4,04	9,02	0,09
C6LHlki	161	6,75	3,63	7,36	0,00	14,54	0,29	C3PBrka	161	4,57	0,89	4,60	1,41	6,57	0,07	C5PHlka	159	6,25	1,13	6,24	2,78	9,22	0,09
C7LHrki	160	11,55	2,45	11,80	1,63	16,03	0,19	C3PBlka	161	4,37	0,89	4,39	0,64	6,64	0,07	C6PHrka	161	5,98	1,25	5,90	1,51	9,08	0,10
C7LHlki	160	11,49	2,62	11,66	3,90	16,64	0,21	C4PBrka	161	4,84	1,00	4,89	0,71	7,62	0,08	C6PHlka	161	5,96	1,21	5,96	1,58	8,97	0,10
C2LWr	161	40	4,49	40,49	26,99	54,82	0,35	C4PBlka	161	4,57	0,92	4,58	0,63	6,99	0,07	C7PHrka	161	6,66	1,14	6,58	3,88	10,01	0,09
C2LWl	161	42	4,50	41,66	29,92	58,00	0,35	C5PBrka	159	5,34	0,98	5,37	2,56	7,98	0,08	C7PHlka	161	6,64	1,17	6,47	4,49	10,08	0,09
C3LWr	159	38	4,90	37,96	25,23	49,62	0,39	C5PBlka	159	5,27	1,01	5,32	1,96	8,02	0,08	C2PHrki	160	6,08	1,76	6,23	0,00	9,91	0,14
C3LWl	161	39	4,34	38,68	25,20	49,67	0,34	C6PBrka	161	5,60	0,93	5,50	3,12	8,40	0,07	C2PHlki	161	6,27	2,04	6,47	0,00	15,46	0,16
C4LWr	160	37	4,55	37,32	22,54	50,32	0,36	C6PBlka	161	5,49	0,93	5,53	2,06	8,13	0,07	C3PHrki	161	2,57	1,21	2,58	0,00	5,16	0,09

Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se
C3PHlki	161	2,46	1,36	2,38	0,00	9,00	0,11	C5MLFr	160	118	26,64	115,60	57,10	198,90	2,11	C7MLLit	161	14,18	2,49	14,01	10,09	30,05	0,20
C4PHrki	161	2,49	1,22	2,55	0,00	6,08	0,10	C5MLFI	160	121	29,26	117,40	60,10	217,80	2,31	C2MLLrsch	161	20,91	3,98	21,55	11,09	31,33	0,31
C4PHlki	161	2,45	1,28	2,36	0,00	5,70	0,10	C6MLFr	160	120	29,41	117,50	52,60	194,70	2,33	C2MLLlsch	160	20,97	3,81	21,80	11,44	29,79	0,30
C5PHrki	159	2,27	1,23	2,34	0,00	6,40	0,10	C6MLFI	161	120	29,24	116,40	64,50	207,00	2,30	C3MLLrsch	160	15,05	1,86	14,83	10,33	21,22	0,15
C5PHlki	159	2,35	1,32	2,36	0,00	9,00	0,10	C7MLFr	161	133	37,22	130,00	32,00	248,10	2,93	C3MLLlsch	161	15,05	1,80	15,11	10,62	22,99	0,14
C6PHrki	161	2,57	1,10	2,56	0,00	6,20	0,09	C7MLFI	161	133	36,78	131,90	29,60	243,60	2,90	C4MLLrsch	161	16,00	2,35	15,85	8,75	22,60	0,19
C6PHlki	161	2,49	1,23	2,59	0,00	6,55	0,10	C2MLLrsag	161	22,81	4,42	23,61	11,76	31,20	0,35	C4MLLlsch	161	15,95	2,13	15,77	9,87	21,21	0,17
C7PHrki	161	3,60	1,08	3,67	0,00	6,28	0,08	C2MLLlsag	160	23,76	3,90	24,31	12,42	33,44	0,31	C5MLLrsch	160	16,53	2,35	16,80	10,34	22,53	0,19
C7PHlki	161	3,50	1,09	3,52	0,56	6,31	0,09	C3MLLrsag	160	14,33	1,97	14,10	10,23	22,42	0,16	C5MLLlsch	160	16,52	2,38	16,41	10,77	26,12	0,19
C2PW r	160	31	6,91	30,70	12,81	54,95	0,55	C3MLLlsag	161	14,42	1,83	14,31	10,52	21,54	0,14	C6MLLrsch	160	18,94	2,91	19,25	11,80	26,04	0,23
C2PWI	161	34	8,51	33,54	12,78	60,76	0,67	C4MLLrsag	161	14,60	2,23	14,60	10,03	22,63	0,18	C6MLLlsch	161	19,27	2,87	19,32	10,76	26,17	0,23
C3PW r	161	47	4,46	46,41	34,61	58,32	0,35	C4MLLlsag	161	14,57	2,10	14,35	10,08	22,08	0,17	C7MLLrsch	161	20,20	4,33	19,92	9,88	36,40	0,34
C3PWI	161	49	5,48	47,92	36,01	67,83	0,43	C5MLLrsag	160	14,68	2,36	14,50	9,62	21,81	0,19	C7MLLlsch	161	20,24	3,81	20,10	9,67	31,15	0,30
C4PW r	161	51	4,91	50,20	40,02	73,36	0,39	C5MLLlsag	160	14,70	2,18	14,45	10,67	22,69	0,17	C2MLHr	161	11,20	2,19	11,13	7,16	21,34	0,17
C4PWI	161	52	5,88	51,45	37,13	71,72	0,46	C6MLLrsag	160	15,28	2,69	15,20	8,89	23,76	0,21	C2MLHI	160	11,73	2,96	11,29	6,46	30,50	0,23
C5PW r	158	49	6,24	49,55	2,00	58,92	0,50	C6MLLlsag	161	15,30	2,51	15,11	9,68	23,79	0,20	C3MLHr	160	10,12	2,43	9,95	4,23	25,52	0,19
C5PWI	159	49	6,02	49,69	32,66	64,26	0,48	C7MLLrsag	161	16,86	3,08	16,93	0,99	25,15	0,24	C3MLHI	161	9,87	2,64	9,55	5,53	28,80	0,21
C6PW r	161	44	5,74	44,57	26,95	55,69	0,45	C7MLLlsag	161	16,85	2,74	16,56	7,72	27,08	0,22	C4MLHr	161	8,88	1,67	8,88	5,61	17,67	0,13
C6PWI	161	44	6,40	44,22	28,21	57,80	0,50	C2MLLrt	161	9,05	1,59	8,84	5,12	17,60	0,13	C4MLHI	161	8,88	1,52	8,76	4,91	16,43	0,12
C7PW r	161	34	6,64	35,17	8,74	60,00	0,52	C2MLLit	160	9,31	1,41	9,22	5,18	13,36	0,11	C5MLHr	160	8,75	1,64	8,75	4,06	13,99	0,13
C7PWI	161	33	5,35	33,82	18,96	46,09	0,42	C3MLLrt	160	11,57	1,73	11,36	8,33	21,29	0,14	C5MLHI	160	8,88	1,53	8,76	5,62	13,80	0,12
C2PKr	160	0,42	0,49	0,00	0,00	1,00	0,04	C3MLLit	161	11,68	1,61	11,51	7,65	20,06	0,13	C6MLHr	160	7,34	1,56	7,12	4,21	13,17	0,12
C2PKI	161	0,33	0,47	0,00	0,00	1,00	0,04	C4MLLrt	161	11,99	1,62	11,89	8,55	17,12	0,13	C6MLHI	161	7,46	1,39	7,26	4,45	11,71	0,11
C2MLFr	161	65	20,04	61,90	22,80	134,30	1,58	C4MLLit	161	12,15	1,78	11,95	8,13	21,45	0,14	C7MLHr	161	6,46	1,55	6,28	0,55	16,83	0,12
C2MLFI	159	67	19,12	65,90	22,10	126,30	1,52	C5MLLrt	160	13,11	1,64	12,97	8,73	17,73	0,13	C7MLHI	161	6,54	1,39	6,42	4,04	15,17	0,11
C3MLFr	160	104	29,64	100,65	52,30	299,80	2,34	C5MLLit	160	13,39	1,80	13,40	8,87	20,28	0,14								
C3MLFI	161	105	25,56	100,40	46,70	202,60	2,01	C6MLLrt	160	13,21	1,81	13,20	8,93	19,40	0,14								
C4MLFr	161	107	24,83	104,40	52,60	174,10	1,96	C6MLLit	161	13,34	1,76	13,19	9,18	17,49	0,14								
C4MLFI	161	109	27,05	106,00	52,30	228,60	2,13	C7MLLrt	161	13,95	2,16	13,66	9,05	22,75	0,17								



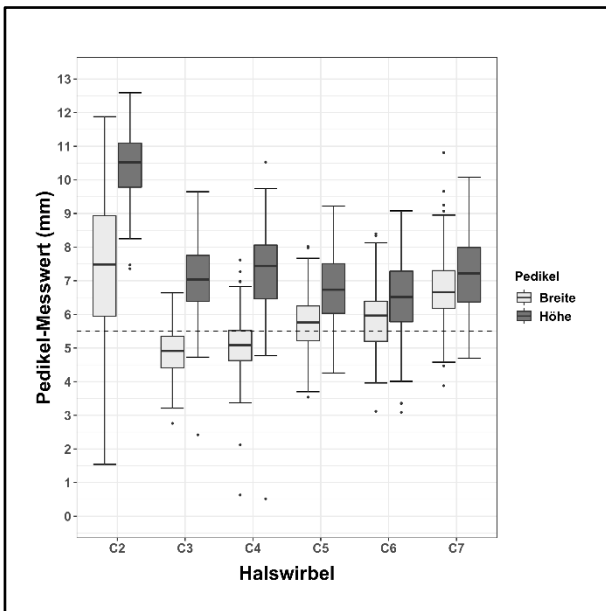
**Tab. 50:** Statistische Daten des Gesamtkollektivs ohne Seitentrennung; n: Anzahl Messwerte, mean: Mittelwert, sd: Standardabweichung, med: Median, min: minimaler Messwert, max: maximaler Messwert, se: Standardfehler, Werte linearer Messungen in mm, Winkel in Grad, Flächen in mm<sup>2</sup>

Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se	Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se
C2LL	322	33,62	2,92	33,59	25,34	42,49	0,16	C7LHki	320	11,52	2,53	11,73	1,63	16,64	0,14	C6PHka	322	5,97	1,23	5,94	1,51	9,08	0,07
C3LL	321	33,42	3,30	33,28	22,89	41,41	0,18	C2LW	322	41	4,54	41,11	26,99	58,00	0,25	C7PHka	322	6,65	1,15	6,53	3,88	10,08	0,06
C4LL	320	33,97	3,73	34,03	25,28	49,64	0,21	C3LW	320	38	4,65	38,44	25,20	49,67	0,26	C2PHki	321	6,18	1,91	6,35	0,00	15,46	0,11
C5LL	318	33,57	4,34	33,05	24,63	53,67	0,24	C4LW	320	38	4,47	37,65	22,54	50,95	0,25	C3PHki	322	2,51	1,28	2,51	0,00	9,00	0,07
C6LL	321	31,11	4,55	30,28	22,84	45,38	0,25	C5LW	318	38	4,23	38,07	22,00	49,90	0,24	C4PHki	322	2,47	1,25	2,50	0,00	6,08	0,07
C7LL	322	34,03	7,26	32,01	22,79	57,16	0,40	C6LW	321	37	4,03	37,33	25,76	48,62	0,22	C5PHki	318	2,31	1,27	2,36	0,00	9,00	0,07
C2LBka	322	5,57	1,28	5,56	1,90	9,15	0,07	C7LW	322	35	4,17	35,46	18,33	47,16	0,23	C6PHki	322	2,53	1,16	2,57	0,00	6,55	0,06
C3LBka	321	3,07	0,86	3,03	0,96	5,50	0,05	C2PL	320	27,30	3,26	27,25	18,51	44,32	0,18	C7PHki	322	3,55	1,08	3,59	0,00	6,31	0,06
C4LBka	320	2,38	0,73	2,37	0,77	5,14	0,04	C3PL	322	31,98	3,51	32,06	21,39	43,05	0,20	C2PW	321	32	7,85	31,99	12,78	60,76	0,44
C5LBka	318	2,09	0,65	2,05	0,48	3,95	0,04	C4PL	322	33,77	3,30	33,94	20,29	45,55	0,18	C3PW	322	48	5,05	47,24	34,61	67,83	0,28
C6LBka	321	2,56	0,72	2,52	0,34	4,47	0,04	C5PL	318	34,59	3,21	34,35	22,34	48,39	0,18	C4PW	322	51	5,43	51,05	37,13	73,36	0,30
C7LBka	322	4,39	0,97	4,33	1,83	7,42	0,05	C6PL	322	34,20	3,71	33,94	23,31	50,31	0,21	C5PW	317	49	6,13	49,65	2,00	64,26	0,34
C2LBki	322	3,18	1,33	3,25	0,00	7,16	0,07	C7PL	320	30,74	3,53	30,52	21,68	42,16	0,20	C6PW	322	44	6,07	44,40	26,95	57,80	0,34
C3LBki	321	1,40	1,86	1,24	0,00	30,77	0,10	C2PBka	321	6,93	2,02	7,00	0,61	11,88	0,11	C7PW	322	34	6,05	34,25	8,74	60,00	0,34
C4LBki	320	0,77	0,80	0,72	0,00	7,60	0,04	C3PBka	322	4,47	0,89	4,50	0,64	6,64	0,05	C2MLF	320	66	19,60	64,55	22,10	134,30	1,10
C5LBki	318	0,56	0,59	0,46	0,00	2,73	0,03	C4PBka	322	4,70	0,97	4,71	0,63	7,62	0,05	C3MLF	321	104	27,62	100,40	46,70	299,80	1,54
C6LBki	321	1,00	0,68	1,01	0,00	2,92	0,04	C5PBka	318	5,31	0,99	5,37	1,96	8,02	0,06	C4MLF	322	108	25,94	105,70	52,30	228,60	1,45
C7LBki	322	2,47	0,93	2,46	0,00	5,75	0,05	C6PBka	322	5,54	0,93	5,52	2,06	8,40	0,05	C5MLF	320	120	27,97	115,75	57,10	217,80	1,56
C2LHka	322	12,07	1,63	12,00	7,51	16,64	0,09	C7PBka	322	6,41	1,06	6,41	3,34	10,81	0,06	C6MLF	321	120	29,28	116,60	52,60	207,00	1,63
C3LHka	321	11,18	1,53	11,22	6,72	16,19	0,09	C2PBki	321	4,01	1,78	4,02	0,00	8,54	0,10	C7MLF	322	133	36,94	131,00	29,60	248,10	2,06
C4LHka	320	10,97	1,65	10,88	5,46	14,80	0,09	C3PBki	322	1,81	1,09	1,85	0,00	4,84	0,06	C2MLLsag	321	23,28	4,19	23,95	11,76	33,44	0,23
C5LHka	318	11,43	1,69	11,39	6,82	18,10	0,09	C4PBki	322	1,88	1,13	1,85	0,00	4,76	0,06	C3MLLsag	321	14,38	1,90	14,23	10,23	22,42	0,11
C6LHka	321	12,69	2,09	12,64	1,82	18,91	0,12	C5PBki	318	2,17	1,34	2,21	0,00	5,70	0,08	C4MLLsag	322	14,59	2,16	14,38	10,03	22,63	0,12
C7LHka	320	16,18	1,91	16,13	10,70	22,70	0,11	C6PBki	322	2,62	1,32	2,75	0,00	6,03	0,07	C5MLLsag	320	14,69	2,27	14,50	9,62	22,69	0,13
C2LHki	322	8,04	2,34	8,20	0,00	14,82	0,13	C7PBki	322	3,97	1,21	3,98	0,00	8,07	0,07	C6MLLsag	321	15,29	2,60	15,12	8,89	23,79	0,14
C3LHki	321	5,51	2,79	5,91	0,00	12,81	0,16	C2PHka	321	10,07	1,42	9,93	5,56	23,00	0,08	C7MLLsag	322	16,85	2,91	16,79	0,99	27,08	0,16
C4LHki	320	4,22	3,24	4,72	0,00	12,79	0,18	C3PHka	322	6,55	1,08	6,45	2,42	9,65	0,06	C2MLLt	321	9,18	1,51	9,00	5,12	17,60	0,08
C5LHki	318	4,12	3,53	4,24	0,00	14,27	0,20	C4PHka	322	6,76	1,22	6,63	0,52	10,53	0,07	C3MLLt	321	11,62	1,67	11,45	7,65	21,29	0,09
C6LHki	321	6,94	3,63	7,62	0,00	16,35	0,20	C5PHka	318	6,25	1,12	6,17	2,78	9,22	0,06	C4MLLt	322	12,07	1,70	11,95	8,13	21,45	0,09

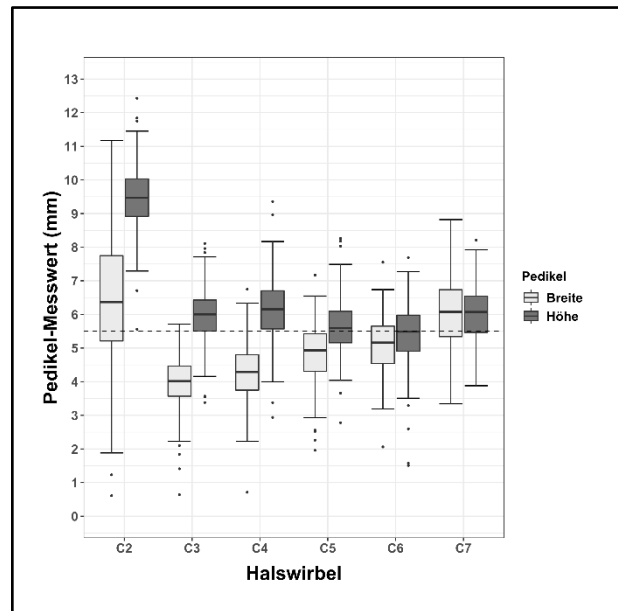
Parameter	n	mean	sd	med	min	max	se
C5MLLt	320	13,25	1,73	13,22	8,73	20,28	0,10
C6MLLt	321	13,28	1,79	13,19	8,93	19,40	0,10
C7MLLt	322	14,06	2,33	13,73	9,05	30,05	0,13
C2MLLsch	321	20,94	3,89	21,65	11,09	31,33	0,22
C3MLLsch	321	15,05	1,82	14,95	10,33	22,99	0,10
C4MLLsch	322	15,97	2,24	15,83	8,75	22,60	0,12
C5MLLsch	320	16,53	2,36	16,58	10,34	26,12	0,13
C6MLLsch	321	19,11	2,89	19,28	10,76	26,17	0,16
C7MLLsch	322	20,22	4,07	20,00	9,67	36,40	0,23
C2MLH	321	11,47	2,61	11,19	6,46	30,50	0,15
C3MLH	321	10,00	2,54	9,70	4,23	28,80	0,14
C4MLH	322	8,88	1,59	8,84	4,91	17,67	0,09
C5MLH	320	8,82	1,58	8,75	4,06	13,99	0,09
C6MLH	321	7,40	1,48	7,18	4,21	13,17	0,08
C7MLH	322	6,50	1,47	6,36	0,55	16,83	0,08

**Tab. 51:** p-Werte des Geschlechtervergleiches; nicht signifikante Unterschiede fett gedruckt (Signifikanzniveau  $p=0,03$ )

Parameter	p-Wert	Parameter	p-Wert	Parameter	p-Wert	Parameter	p-Wert
C2HmD	3,997E-11	C2BLs	4,890E-14	C5LHak	5,072E-13	C2PHik	3,460E-04
C2HoD	1,084E-10	C3BLs	5,688E-12	C6LHak	9,176E-11	C3PHik	3,307E-07
C2DBk	<b>8,797E-01</b>	C4BLs	7,511E-10	C7LHak	9,585E-13	C4PHik	3,944E-10
C2DBs	6,573E-08	C5BLs	3,321E-08	C2LHik	2,725E-04	C5PHik	5,359E-11
C3WHv	2,740E-13	C6BLs	9,804E-09	C3LHik	2,393E-03	C6PHik	1,246E-11
C4WHv	8,820E-15	C7BLs	6,544E-14	C4LHik	3,666E-06	C7PHik	2,034E-10
C5WHv	2,105E-10	C2BBt	5,628E-03	C5LHik	1,542E-04	C2MLF	2,149E-09
C6WHv	1,259E-11	C3BBt	1,712E-04	C6LHik	8,690E-06	C3MLF	8,912E-10
C7WHv	8,302E-12	C4BBt	<b>6,460E-02</b>	C7LHik	6,580E-08	C4MLF	9,421E-09
C3WHz	2,200E-16	C5BBt	2,860E-04	C2PL	2,717E-08	C5MLF	2,452E-12
C4WHz	1,237E-15	C6BBt	3,752E-08	C3PL	4,479E-14	C6MLF	2,656E-09
C5WHz	1,255E-13	C7BBt	5,324E-11	C4PL	2,200E-16	C7MLF	1,751E-07
C6WHz	1,231E-12	C2LL	5,997E-09	C5PL	9,952E-15	C2MLLsag	<b>4,879E-02</b>
C7WHz	1,698E-14	C3LL	1,119E-07	C6PL	2,200E-16	C3MLLsag	1,582E-05
C3WHd	8,586E-16	C4LL	4,539E-11	C7PL	2,200E-16	C4MLLsag	1,419E-04
C4WHd	1,362E-12	C5LL	1,970E-09	C2PBak	1,180E-05	C5MLLsag	4,589E-07
C5WHd	1,818E-12	C6LL	1,576E-07	C3PBak	2,200E-16	C6MLLsag	5,723E-03
C6WHd	3,465E-09	C7LL	<b>3,968E-01</b>	C4PBak	2,180E-15	C7MLLsag	3,693E-07
C7WHd	2,460E-11	C2LBak	<b>4,999E-01</b>	C5PBak	2,200E-16	C2MLLt	3,443E-08
C3DLs	6,601E-09	C3LBak	<b>7,517E-01</b>	C6PBak	1,108E-15	C3MLLt	8,985E-10
C4DLs	7,874E-09	C4LBak	3,484E-04	C7PBak	2,677E-09	C4MLLt	7,234E-09
C5DLs	8,470E-09	C5LBak	1,542E-04	C2PBik	5,934E-06	C5MLLt	2,095E-10
C6DLs	1,907E-05	C6LBak	7,177E-07	C3PBik	1,613E-13	C6MLLt	7,952E-10
C7DLs	3,986E-09	C7LBak	<b>4,157E-02</b>	C4PBik	7,499E-11	C7MLLt	7,284E-04
C3DBt	8,873E-09	C2LBik	<b>6,623E-01</b>	C5PBik	2,068E-14	C2MLLsch	1,049E-03
C4DBt	2,993E-07	C3LBik	<b>2,727E-01</b>	C6PBik	3,433E-11	C3MLLsch	4,588E-05
C5DBt	7,565E-08	C4LBik	1,025E-04	C7PBik	2,920E-09	C4MLLsch	3,701E-03
C6DBt	1,709E-05	C5LBik	1,098E-03	C2PW	<b>9,542E-02</b>	C5MLLsch	2,121E-06
C7DBt	1,298E-03	C6LBik	7,675E-05	C3PW	2,284E-02	C6MLLsch	3,228E-03
C3WLzs	1,668E-09	C7LBik	6,036E-03	C4PW	<b>7,793E-02</b>	C7MLLsch	2,873E-05
C4WLzs	6,986E-10	C2LW	4,161E-03	C5PW	<b>2,912E-01</b>	C2MLH	<b>9,765E-02</b>
C5WLzs	1,881E-09	C3LW	1,778E-03	C6PW	<b>2,047E-01</b>	C3MLH	<b>4,053E-02</b>
C6WLzs	1,982E-07	C4LW	6,237E-05	C7PW	<b>8,416E-02</b>	C4MLH	8,067E-05
C7WLzs	6,796E-12	C5LW	1,210E-06	C2PHak	1,452E-08	C5MLH	9,276E-09
C3WBzt	9,294E-12	C6LW	1,962E-06	C3PHak	2,200E-16	C6MLH	1,230E-13
C4WBzt	8,716E-06	C7LW	<b>3,117E-01</b>	C4PHak	2,200E-16	C7MLH	3,009E-04
C5WBzt	5,267E-07	C2LHak	1,435E-12	C5PHak	2,200E-16		
C6WBzt	4,650E-06	C3LHak	2,741E-09	C6PHak	2,200E-16		
C7WBzt	2,936E-06	C4LHak	2,041E-12	C7PHak	2,200E-16		

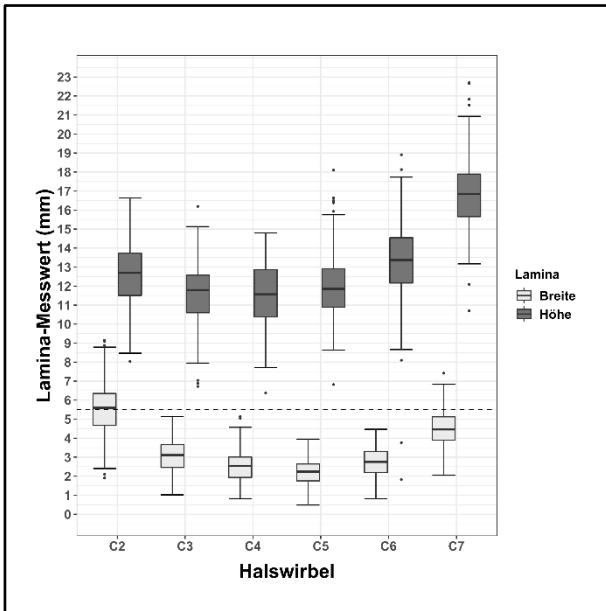


**Abb. 106: Boxplot der Pedikelbreite und -höhe C2-C7 bei Männern;** mögliche Schraubenplatzierung oberhalb der gestrichelten Linie: ausreichende Höhen- und Breitendurchmesser für 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz. Box: 25%- und 75%-Quantil, horizontale Linie in der Box: Median, horizontale Linien: 25%-Quantil -  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand bzw.  $75\text{-}\% \text{-Quantil} + 1,5 \cdot$  Interquartilsabstand, Einzelpunkte: Ausreißer (zugunsten einer optimierten Darstellung wurde auf eine vollständige Abbildung extremer Ausreißer verzichtet)

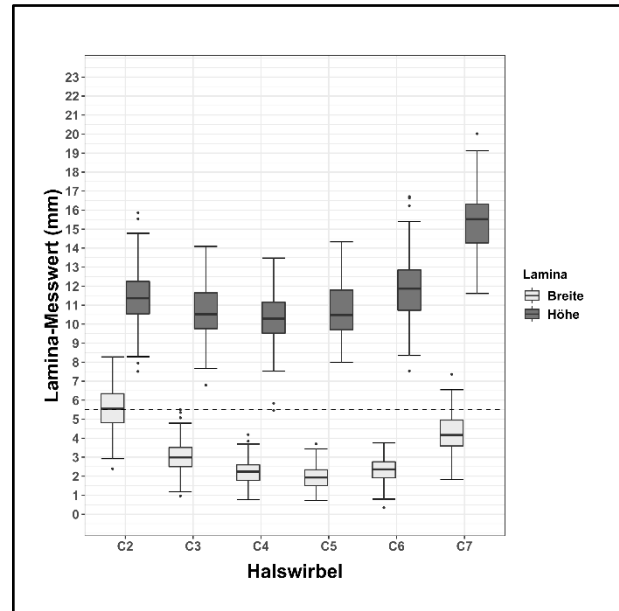


**Abb. 107: Boxplot der Pedikelbreite und -höhe C2-C7 bei Frauen;** mögliche Schraubenplatzierung oberhalb der gestrichelten Linie: ausreichende Höhen- und Breitendurchmesser für 3,5 mm Pedikelschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz. Box: 25%- und 75%-Quantil, horizontale Linie in der Box: Median, horizontale Linien: 25%-Quantil -  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand bzw.  $75\text{-}\% \text{-Quantil} + 1,5 \cdot$  Interquartilsabstand, Einzelpunkte: Ausreißer (zugunsten einer optimierten Darstellung wurde auf eine vollständige Abbildung extremer Ausreißer verzichtet)





**Abb. 108: Boxplot der Laminabreite und -höhe C2-C7 bei Männern;** mögliche Schraubenplatzierung oberhalb der gestrichelten Linie: ausreichende Höhen- und Breitendurchmesser für 3,5 mm Laminaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz. Box: 25%- und 75%-Quantil, horizontale Linie in der Box: Median, horizontale Linien: 25%-Quantil -  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand bzw.  $75\%$ -Quantil +  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand, Einzelpunkte: Ausreißer (zugunsten einer optimierten Darstellung wurde auf eine vollständige Abbildung extremer Ausreißer verzichtet)



**Abb. 109: Boxplot der Laminabreite und -höhe C2-C7 bei Frauen;** mögliche Schraubenplatzierung oberhalb der gestrichelten Linie: ausreichende Höhen- und Breitendurchmesser für 3,5 mm Lamiaschrauben mit 2 mm Sicherheitstoleranz. Box: 25%- und 75%-Quantil, horizontale Linie in der Box: Median, horizontale Linien: 25%-Quantil -  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand bzw.  $75\%$ -Quantil +  $1,5 \cdot$  Interquartilsabstand, Einzelpunkte: Ausreißer (zugunsten einer optimierten Darstellung wurde auf eine vollständige Abbildung extremer Ausreißer verzichtet)

## **10. Danksagung**

Mein Dank gilt Herrn PD Dr. med. Koroush Kabir für die freundliche Überlassung des Themas sowie für die kompetente hilfreiche Unterstützung und Beratung.

Zudem bedanke ich mich bei meiner Familie für ihre aufmunternde Unterstützung bei der Erstellung der Dissertation.