

Diplomarbeit

**COMPUTERUNTERSTÜTZTE ANALYSE DER
OPTIMALEN LAGE UND LÄNGE VON
MASSA-LATERALIS-SCHRAUBEN BEI OPERATIVER
VERSORGUNG VON JEFFERSON-FRAKTUREN**

eingereicht von

Jakob Andrea Orlandi-Arrigoni

16.08.1988

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der gesamten Heilkunde
(Dr. med. univ.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Universitätsklinik für Unfallchirurgie

unter der Anleitung von

Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Wolfgang Pichler

Univ.-Ass. Dr. med. univ. Paul Puchwein

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am 27.5.2014

Jakob Andrea Orlandi-Arrigoni

Danksagung

Ich bedanke mich bei Univ.-Ass. Dr. med. univ. Paul Puchwein und Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Wolfgang Pichler für die Bereitstellung dieses sehr interessanten Themas, für die ausgezeichnete Betreuung und für die Freiheit der eigenständigen Gestaltung der zeitlichen Rahmenbedingungen.

Zusammenfassung

Berstungsfrakturen des Atlas, sogenannte Jefferson-Frakturen, machen nur einen relativ geringen Anteil aller Verletzungen der Halswirbelsäule aus. Trotzdem kommt diesem Frakturtyp eine hohe Bedeutung zu, da es sich hier um eine sehr sensible Region handelt und therapeutische Fehlentscheidungen gravierende Auswirkungen für den Patienten zur Folge haben können. Aufgrund fehlender Studien mit höheren Evidenzleveln mangelt es zurzeit noch an einheitlichen Empfehlungen zur Versorgung von Jefferson-Frakturen.

In erster Linie ausschlaggebend für die Wahl der Therapie ist die Frage nach der Stabilität. Während stabile Frakturen in der Regel konservativ und instabile Berstungsbrüche meist chirurgisch behandelt werden, gehen die Meinungen zur Versorgung von Jefferson-Frakturen, bei denen das Ausmaß der Stabilität nicht eindeutig bestimmt werden kann, beträchtlich auseinander. Es gibt sowohl Vertreter, die im Zweifelsfalle eine konservative Therapie befürworten, um das Operationsrisiko zu vermeiden, als auch jene, die sich zu einem raschen chirurgischen Vorgehen entschließen, um die Gefahr der Entstehung sekundärer Dislokationen und Pseudarthrosen zu minimieren. Um diese Problematik etwas ausführlicher aufzuzeigen, wurden in dieser Diplomarbeit auch ausgewählte Fallbeispiele zu diesem Thema präsentiert.

Der eigentliche Kernpunkt dieser Arbeit liegt jedoch in der Lagebestimmung von Massa-lateralis-Schrauben. Hierfür wurden in 50 CT-Datensätzen, angefertigt von einem 64-zeiligen Computertomographen der Firma *Siemens SOMATOM Sensation® CT System* (Siemens Medical Solutions USA Inc., 51 Valley Stream Parkway, Malvern, PA 19355, United States), mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms *Mimics®* (Materialise HQ, Technologielaan 15, 3000 Leuven, Belgium) die intraoperativ angestrebte Lokalisation dieser Schrauben simuliert. Anschließend wurden sowohl ihre Längen und Einbringwinkel, als auch die Abstände zu gefährdeten Strukturen erhoben und die Ergebnisse zusätzlich geschlechtsspezifisch analysiert.

Bezüglich der Schraubenlänge wurden dabei Mittelwerte von $29,96 \pm 2,31$ mm auf der rechten und $30,08 \pm 2,07$ mm auf der linken Seite erhoben. Der Transversalwinkel betrug im Mittel rechts $16,38 \pm 5,58^\circ$ und links $15,62 \pm 6,27^\circ$, der Sagittalwinkel wies Werte von rechts $8,25 \pm 3,79^\circ$ und links $11,00 \pm 4,89^\circ$ auf. Für die Distanz zwischen Schraube und Spinalkanal wurde rechts ein Mittelwert von $2,37 \pm 0,72$ mm und links von $2,16 \pm 0,59$ mm ermittelt. Der Abstand der Massa-lateralis-Schraube zur Arteria vertebralis belief sich im Mittel rechts auf $7,10 \pm 1,50$ mm, wobei hier als einziges eine signifikante Korrelation mit dem Geschlecht gezeigt werden konnte (p-Wert: 0,0324), und links auf $7,44 \pm 1,38$ mm. Für die Schrauben selbst wurde ein Durchmesser von 4 mm gewählt.

Abgesehen von Studienzwecken würde sich diese Technik der 3D-Rekonstruktion auch hervorragend zur präoperativen Planung von komplizierten Operationen eignen, speziell in jenen Fällen, in denen die CT-Aufnahmen nicht achsengerecht geschnitten oder rekonstruiert wurden. Der Benefit könnte dabei in einer Verringerung der intraoperativen Komplikationsrate liegen. Man darf gespannt sein, welche Innovationen es in Zukunft noch in dieser Technologie geben wird.

Abstract

Burst fractures of the atlas, so-called Jefferson fractures, only represent a relatively small percentage of all injuries of the cervical spine. Nevertheless, this type of fracture has an important meaning because incorrect treatment decisions in this sensitive region may have serious consequences for the patient. At the moment there is a lack of standardized recommendations for the medical care of Jefferson fractures on account of missing studies with higher evidence levels.

First and foremost decisive for the choice of therapy is the question of stability. Stable fractures are usually treated conservatively while unstable burst fractures require surgery. The opinions on the proper medical care of Jefferson fractures differ considerably in those cases in which the extent of stability cannot be clearly determined. There are representatives who advocate a conservative therapy in cases of doubt to avoid the risk of surgery as well as those who choose a rapid surgical procedure to minimize the risk of development of secondary dislocations and non-union. In order to demonstrate this problem in detail, selected case studies on this topic were also presented in this thesis.

The main issue of this dissertation is the positioning of C1 lateral mass screws. Those were simulated on 50 CT scans, produced by a 64-slice CT of the company *Siemens SOMATOM Sensation® CT System* (Siemens Medical Solutions USA Inc., 51 Valley Stream Parkway, Malvern, PA 19355, United States), by using the 3D reconstruction software *Mimics®* (Materialise HQ, Technologielaan 15, 3000 Leuven, Belgium). After having reached the intraoperative targeted screw localizations, the lengths, the transverse and sagittal angles and the distances of the screws to vulnerable structures were measured and additionally the results were analysed gender-specifically.

An arithmetic mean for the screw length of 29.96 ± 2.31 mm on the right side and 30.08 ± 2.07 mm on the left side was measured. The transverse angle was on average $16.38 \pm 5.58^\circ$ on the right and $15.62 \pm 6.27^\circ$ on the left, the sagittal angle averaged $8.25 \pm 3.79^\circ$ on the right and $11.00 \pm 4.89^\circ$ on the left side. For the distance between screw and the spinal canal an arithmetic mean of 2.37 ± 0.72 mm has been determined on the right and 2.16 ± 0.59 mm on the left side. The distance of the C1 lateral mass screw to the vertebral artery was on average 7.10 ± 1.50 mm on the right side (significant correlation with gender, p-value: 0324) and 7.44 ± 1.38 mm on the left side. For the screws, a diameter of 4 mm was chosen.

Apart from the purpose of study, this technique of 3D reconstruction would also be suitable for the preoperative planning of complex operations, especially in those cases in which the CT scans were not axially sliced or reconstructed. The benefit might be in the reduction of the intraoperative complication rate. It might be interesting to see what innovations there will be in this technology in the future.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
ZUSAMMENFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	V
GLOSSAR UND ABKÜRZUNGEN	VIII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 ANATOMISCHE GRUNDLAGEN	2
1.1.1 WIRBELSÄULE	2
1.1.2 WIRBELKANAL	3
1.1.3 HALSWIRBELSÄULE	4
1.1.3.1 Bewegungsausmaß	5
1.1.3.2 Untere Halswirbelsäule	5
1.1.3.3 Obere Halswirbelsäule	6
1.1.3.3.1 Atlas	6
1.1.3.3.1.1 Entwicklung	7
1.1.3.3.1.2 Atlasassimilation	8
1.1.3.3.2 Axis	9
1.1.3.3.3 Kopfgelenke	10
1.1.3.3.3.1 Articulatio atlantooccipitalis	11
1.1.3.3.3.2 Articulatio atlantoaxialis	11
1.1.3.3.4 Bandapparat	12
1.1.3.3.5 Arteria vertebralis	15
1.2 JEFFERSON-FRAKTUR	18

1.2.1	DEFINITION	18
1.2.2	KLASSIFIKATION NACH JEFFERSON (1920)	18
1.2.3	KLASSIFIKATIONEN IM ÜBERBLICK	19
1.2.4	ÄTIOLOGIE	20
1.2.5	INZIDENZ	20
1.2.6	BEGLEITVERLETZUNGEN	21
1.2.7	EINTEILUNG	22
1.2.8	KLINISCHES ERSCHEINUNGSBILD	23
1.2.9	AKUTMAßNAHMEN BEI HWS-TRAUMEN	25
1.2.10	DIAGNOSTIK	26
1.2.10.1	Anamnese	26
1.2.10.2	Inspektion / Palpation	26
1.2.10.3	Klinische Untersuchung	27
1.2.10.4	Bildgebende Verfahren	27
1.2.11	THERAPIE	31
1.2.11.1	Konservative Therapie	32
1.2.11.2	Operative Therapie	34
1.2.11.2.1	Hinterer Operationszugang	34
1.2.11.2.1.1	Direkte dorsale Osteosynthese des Atlas	34
1.2.11.2.1.2	Dorsale C1/C2-Fusion	34
1.2.11.2.1.3	Dorsale C0/C3-Fusion	35
1.2.11.2.1.4	Dorsale C1/C2-Verschraubung nach Magerl	35
1.2.11.2.2	Vorderer Operationszugang	36
1.2.11.2.3	Gefährdete Strukturen	36
2	<u>MATERIAL UND METHODEN</u>	38
2.1	BEZUGSPUNKTE UND ERHEBUNG DER DATEN	39
3	<u>ERGEBNISSE</u>	42
4	<u>DISKUSSION</u>	49
4.1	NACHWORT	53
5	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	54

Glossar und Abkürzungen

SchrLänge, re	<i>Länge der Massa-lateralis-Schraube auf der rechten Seite</i>
SchrLänge, li	<i>Länge der Massa-lateralis-Schraube auf der linken Seite</i>
Winkel transv, re	<i>transversaler Einbringwinkel auf der rechten Seite</i>
Winkel transv, li	<i>transversaler Einbringwinkel auf der linken Seite</i>
Winkel sag, re	<i>sagittaler Einbringwinkel auf der rechten Seite</i>
Winkel sag, li	<i>sagittaler Einbringwinkel auf der linken Seite</i>
Dist. SchrSpin, re	<i>Distanz zwischen Massa-lateralis-Schraube und Spinalkanal auf der rechten Seite</i>
Dist. SchrSpin, li	<i>Distanz zwischen Massa-lateralis-Schraube und Spinalkanal auf der linken Seite</i>
Dist. SchrVert, re	<i>Distanz zwischen Massa-lateralis-Schraube und Arteria vertebralis auf der rechten Seite</i>
Dist. SchrVert, li	<i>Distanz zwischen Massa-lateralis-Schraube und Arteria vertebralis auf der linken Seite</i>

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Wirbelsäule im Überblick</i>	2
<i>Abb. 2: Wirbelkanal mit Inhaltsstrukturen</i>	3
<i>Abb. 3: Halswirbelsäule im Überblick</i>	4
<i>Abb. 4: Halswirbel von kranial</i>	6
<i>Abb. 5: Atlas (C1) von kranial</i>	7
<i>Abb. 6: Synchondrosen des Atlas</i>	8
<i>Abb. 7: Axis (C2) von kranial</i>	10
<i>Abb. 8: Bandstrukturen der Halswirbelsäule</i>	14
<i>Abb. 9: Verlauf der A. vertebralis</i>	17
<i>Abb. 10: Denszielaufnahme mit Auseinanderweichen der Massae laterales</i>	28
<i>Abb. 11: Halo-Fixateur</i>	33
<i>Abb. 12: Geschlechts- und Altersverteilung des Patientenkollektivs</i>	38
<i>Abb. 13: Mimics - Benutzeroberfläche</i>	39
<i>Abb. 14: Ermittlung des Transversalwinkels im Horizontalschnitt</i>	40
<i>Abb. 15: Ermittlung des Sagittalwinkels im Sagittalschnitt</i>	41
<i>Abb. 16: Boxplot – Schraubenlänge</i>	43
<i>Abb. 17: Boxplot – Distanz Schraube - A. vertebralis</i>	45
<i>Abb. 18: Boxplot – Distanz Schraube - Spinalkanal</i>	45
<i>Abb. 19: Boxplot – Transversalwinkel</i>	47
<i>Abb. 20: Boxplot – Sagittalwinkel</i>	48
<i>Abb. 21: 3D-Modell - Ansicht von dorsal</i>	49
<i>Abb. 22: 3D-Modell - Ansicht im Sagittalschnitt</i>	50

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule</i>	<i>5</i>
<i>Tab. 2: Bewegungsausmaß der Art. atlantooccipitalis</i>	<i>11</i>
<i>Tab. 3: Klassifikation nach Jefferson (1920)</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 4: Klassifikation nach Gehweiler (1976)</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 5: Klassifikation nach Dickman (1990).....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 6: Klassifikation nach Levine-Edwards (1991)</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 7: Messergebnisse – Schraubenlänge</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 8: Messergebnisse – Distanz Schraube - A. vertebralis / Distanz Schraube - Spinalkanal.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 9: Messergebnisse – Transversalwinkel</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 10: Messergebnisse – Sagittalwinkel</i>	<i>48</i>

1 Einleitung

Jefferson-Frakturen, die Berstungsbrüche des Atlas, machen mit 7 % (1) nur einen geringen Anteil aller Verletzungen der Halswirbelsäule aus. Trotzdem ist es wichtig, sich mit dieser Thematik auseinanderzusetzen, da durch falsche Therapieentscheidungen in diesem sensiblen Gebiet massive Beeinträchtigungen (z.B. irreversible Inkongruenzen mit persistierenden Schmerzen und Bewegungseinschränkungen, neurologische Defizite) für den Patienten entstehen können. (2) (3)

Die Auswahl der Behandlung wird dabei durch die Tatsache erschwert, dass man sich bis dato noch auf keine einheitlichen Behandlungsrichtlinien einigen konnte. Zwar gibt es bei augenscheinlich stabilen bzw. hochgradig instabilen Berstungsbrüchen eine breite Übereinstimmung über die anzuwendenden Therapien, jedoch ist die Frage nach der besten Behandlungsform von Jefferson-Frakturen mit nicht eindeutig klassifizierbarem Stabilitätsgrad bis heute ungeklärt. (4) (5)

Der Grund, weshalb vor einem chirurgischen Vorgehen oftmals Abstand genommen wird, liegt darin, dass diese Eingriffe mit einem gewissen Operationsrisiko einhergehen. Beim Einbringen der Massa-lateralis-Schrauben sind sowohl das Rückenmark als auch die Arteriae vertebrales einer unmittelbaren Gefahr ausgesetzt. Verschärft wird diese Situation durch die Tatsache, dass Verletzungen auch nur einer dieser beiden Strukturen gravierende, im Extremfall lebensbedrohliche Komplikationen (hoher Blutverlust, Hirnstamminfarkte, ZNS-Entzündungen, irreparable Rückenmarksschäden) darstellen können. (5) (6) (7)

Nichtsdestotrotz sei erwähnt, dass intraoperative Komplikationen, hervorgerufen durch Schraubenfehlagen, grundsätzlich relativ selten vorkommen und in der Literatur mit lediglich 0-5 % (8) (6) angegeben werden.

Aufgrund der schwerwiegenden Folgen von potentiellen Komplikationen ist aber dennoch bei Operationen allerhöchste Vorsicht geboten. Basierend auf derselben Erkenntnis, wurde zum Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit die Bestimmung der optimalen Lage und Länge von Massa-lateralis-Schrauben gesetzt.

Die Diplomarbeit ist im Wesentlichen dreiteilig aufgebaut. Dabei zielt der *erste Teil* darauf ab, einen Überblick über die anatomischen Gegebenheiten zu verschaffen und die Komplexität dieser Region aufzuzeigen. Der *zweite Teil* befasst sich mit den Details zu Jefferson-Frakturen und behandelt unter anderem die Problematik bezüglich Stabilität und Wahl der adäquaten Therapie. Im *dritten Teil* werden die Art und Weise der Datenerhebung erläutert und die anschließend präsentierten Ergebnisse im Rahmen einer Diskussion interpretiert.

1.1 Anatomische Grundlagen

1.1.1 Wirbelsäule

Die Wirbelsäule ist ein zentral gelegenes, knöchernes Gerüst, welches die stabilisierende Basis des Körpers bildet. Als solches dient sie vor allem Muskeln, die für das Gleichgewicht zuständig sind, als Ursprungs- und Ansatzort. Um deren Funktion zu ermöglichen, bedarf es den zwischen den Wirbeln gelegenen Intervertebralgelenken, die in ihrer Gesamtheit ein beachtliches Bewegungsausmaß der Wirbelsäule zulassen.

Die zweite wichtige Funktion besteht im Schutz des Rückenmarks. Besondere Bedeutung erlangt dies durch die Tatsache, dass bei einer Verletzung des Rückenmarks häufig nicht nur das betroffene Segment, sondern sämtliche darunter liegende Segmente ausfallen. (9) (10)

Die Gliederung erfolgt in fünf Abschnitte:

- Halswirbelsäule
- Brustwirbelsäule
- Lendenwirbelsäule
- Kreuzbein
- Steißbein

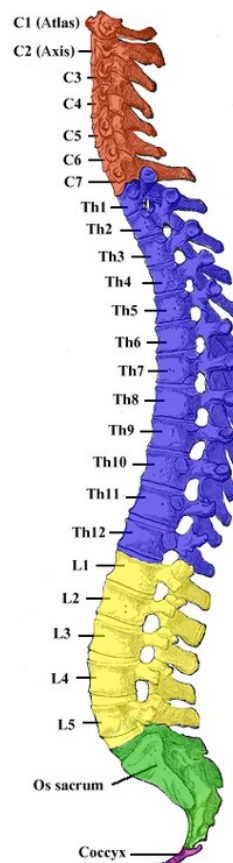


Abb. 1: Wirbelsäule im Überblick

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gray_111_-_Vertebral_column-coloured.png

1.1.2 Wirbelkanal

Der aus den einzelnen Wirbeln gebildete Wirbelkanal beherbergt das Rückenmark und bietet ihm durch seine Stabilität Schutz. Zwischen diesen beiden Strukturen findet man die drei Rückenmarkshäute, welche ihrerseits die Begrenzung für zwei dazwischenliegende Räume darstellen. (9)

Dura mater spinalis: Die *harte Rückenmarkshaut* teilt sich auf Höhe des Foramen magnum in zwei Blätter. Während sich das äußere Blatt als Periost den Wirbelkörpern anlegt, bildet das innere Blatt eine sackartige Struktur, in der sich das gesamte Rückenmark befindet.

Cavum epidurale: Entgegen ihrer Nomenklatur liegt diese Höhle zwischen den beiden Blättern der Dura mater spinalis. Sie beinhaltet einen Venenplexus und Fettgewebe.

Arachnoidea: Die *Spinnwebhaut* liegt der Dura mater spinalis innen an, zwischen diesen beiden Hirnhäuten findet man also keine Höhle. Ihren Namen erhielt sie von den radial ausgerichteten Trabeculae arachnoideae, die eine Verbindung zur Pia mater darstellen.

Cavum subarachnoideale: Diese Höhle wird von der Arachnoidea und der Pia mater begrenzt. In ihr findet man den Liquor cerebrospinalis.

Pia mater: Die *weiche Rückenmarkshaut* ist die am innersten liegende Schicht. Sie hat direkten Kontakt mit dem Rückenmark, sodass sie exakt dessen Konturen übernimmt.

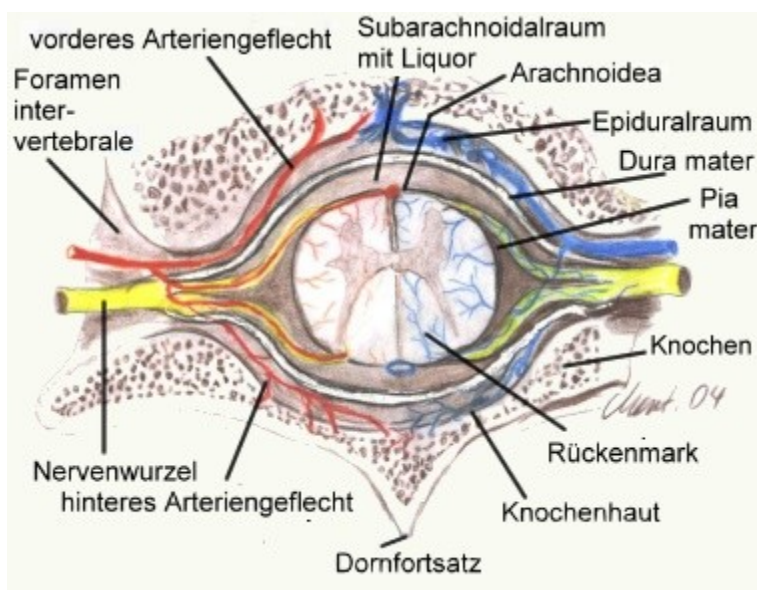


Abb. 2: Wirbelkanal mit Inhaltsstrukturen

1.1.3 Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule ist der oberste Abschnitt der Wirbelsäule und steht sowohl mit der Brustwirbelsäule als auch mit dem Okziput in Verbindung. Im Normalfall besteht sie aus sieben klar abgrenzbaren Halswirbeln. Während die Wirbel C3-C7 eine relativ homogene Form aufweisen, stechen C1 und C2 durch ihre markante Gestalt hervor. Dementsprechend unterscheidet man bei der Halswirbelsäule weiters zwischen einem oberen und einem unteren Abschnitt. (9)



Abb. 3: Halswirbelsäule im Überblick

[http://de.wikipedia.org/wiki/Atlas_\(Halswirbel\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Atlas_(Halswirbel))

1.1.3.1 Bewegungsausmaß

Die Halswirbelsäule besitzt – wie auch die gesamte Wirbelsäule – die Fähigkeit, Bewegungen in alle Richtungen durchführen zu können. Explizit bezeichnet man diese als Ventral-, Dorsal- und Lateralflexion, sowie der Rotation. Aufgrund der besonderen Bauweise der Halswirbel mit den nahezu planen Gelenksflächen verfügt sie sogar über den größten Bewegungsradius aller Wirbelsäulenabschnitte.

Ventralflexion	65°
Dorsalflexion	40°
Lateralflexion	35°
Rotation	50°

Tab. 1: Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule

Jedoch ist dieser großzügige Bewegungsumfang nur auf Kosten der Stabilität zu erlangen. Dies manifestiert sich z.B. in der Tatsache, dass bei komplexen Traumen die Intervertebralgelenke der HWS häufiger und schwerer betroffen sind als jene der BWS oder LWS. (9) (10) (11)

1.1.3.2 Untere Halswirbelsäule

Die untere Halswirbelsäule besteht im Regelfall aus fünf Halswirbeln, welche im Vergleich zu den Brust- und Lendenwirbeln einen kleineren Corpus aufweisen. Im Gegensatz dazu besitzen sie ein relativ großes, dreieckiges Foramen vertebrale, durch welches das Rückenmark zieht. Dieses gibt Spinalnerven ab, welche seitlich durch die Foramina intervertebralia aus dem Wirbelkanal austreten. Dabei stehen sie in unmittelbarem Kontakt mit der Oberfläche der Halswirbel, genauer gesagt, mit den Processi transversi. Quasi als Leitstruktur verfügen diese über einen Sulcus nervi spinalis. Ventral davon, also ebenfalls noch auf dem Querfortsatz befindlich, ist das Foramen transversarium lokalisiert. Durch dieses zieht die Arteria vertebralis.

Die Dornfortsätze weisen ebenfalls eine Besonderheit auf. Sie sind nämlich gespalten, laufen also in zwei Enden aus. Gelegentlich wird auch der Terminus „schwalbenschwanzförmig“ verwendet. (9)

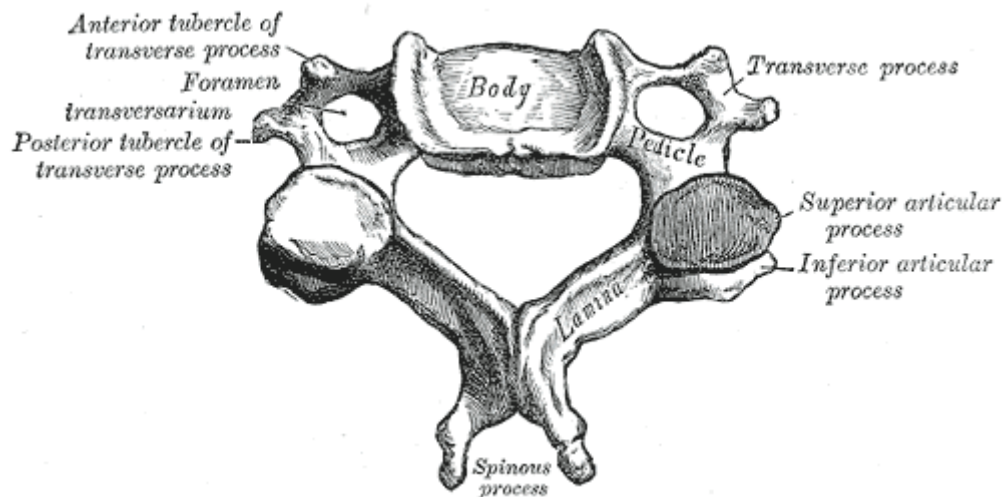


Abb. 4: Halswirbel von kranial

<http://www.fpnotebook.com/ortho/Anatomy/CrvclSpnAntmy.htm>

aus *GRAY'S ANATOMY 20TH ED.*

1.1.3.3 Obere Halswirbelsäule

1.1.3.3.1 Atlas

Der Atlas ist der erste Halswirbel. Er ist annähernd ringförmig, was aus dem Fehlen eines Corpus und eines Processus spinosus resultiert. Letzteres ist durch ein Tuberculum spinosum ersetzt, welches wesentlich dezenter ausgebildet ist. Seitliche Verdickungen des Wirbels werden als Massae laterales bezeichnet. Kranial und kaudal davon liegen die oberen und unteren Gelenksflächen, zusätzlich besitzt der Atlas eine weitere an der Innenseite des vorderen Bogens. Sie wird als Fovea dentis bezeichnet und artikuliert mit dem Dens axis des zweiten Halswirbels. Am hinteren Bogen findet man hingegen den Sulcus arteriae vertebralis, eine rillenförmige Vertiefung, in der die Arteria vertebralis verläuft. In manchen Fällen ist dieser zu einem Canalis arteriae vertebralis geschlossen. (9) (12) (13)

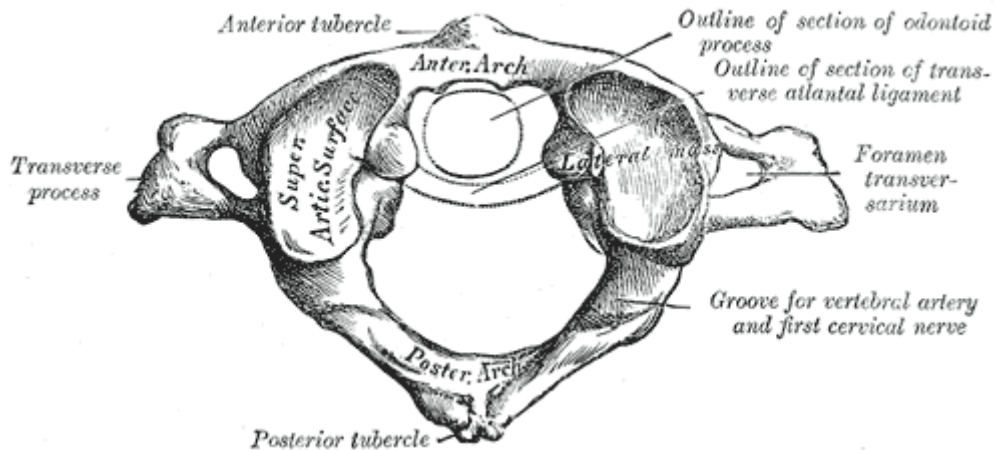


Abb. 5: Atlas (C1) von kranial

<http://www.fpnotebook.com/ortho/Anatomy/CrvclSpnAntmy.htm>

aus GRAY'S ANATOMY 20TH ED.

1.1.3.3.1.1 Entwicklung

Die gesamte Wirbelsäule entwickelt sich aus dem Mesoderm. Dabei kommt es beim Mesenchym zu regelmäßigen Einschnürungen. Die so entstandenen Strukturen werden als Somiten bezeichnet. Aus ihnen gehen wiederum die Sklerotomiten hervor. In dieser Ebene verschmilzt die kaudale Hälfte eines Sklerotoms mit der kranialen Hälfte des darunterliegenden Sklerotoms und bildet einen Wirbel. Eine Besonderheit der oberen Halswirbelsäule ist, dass Sklerotomanteile des ersten Halswirbels auf den zweiten übertragen wurden. Aus diesem Material wird der Dens des Axis gebildet.

Am zunächst als Knorpel vorliegenden Wirbel entstehen in weiterer Folge drei Ossifikationszentren, von denen ausgehend – wie der Name schon sagt – die Verknöcherung beginnt. Während zwei dieser Zentren perichondral liegen, ist das dritte enchondral lokalisiert. Beim Atlas ist es nun so, dass bei fortschreitender Entwicklung der Punkt erreicht wird, an dem der gesamte Wirbel mit Ausnahme dreier Stellen ossifiziert ist. Von diesen drei Punkten liegen zwei im vorderen und einer im hinteren Atlasbogen. Sie markieren jene Stellen, an denen der Wirbel verwächst – er entstammt ja wie gesagt von drei Ossifikationszentren. Dass man in diesen Bereichen bis zur vollständigen Verknöcherung Knorpel findet, ist insofern wichtig zu wissen, weil sie ansonsten in bildgebender Diagnostik fälschlicherweise als Frakturen interpretiert werden könnten. Außerdem sind bezüglich der Ossifikationszentren auch variable Ausprägungen möglich, sodass eine Aufhellungslinie außerhalb der typischen Verwachsungsstellen nicht automatisch als Frakturlinie klassifiziert werden darf.

Anschließend sei noch erwähnt, dass im Regelfall der hintere Atlasbogen vor dem vorderen verknöchert, sodass unter Umständen auch nur am Arcus anterior Spaltbildungen erkennbar sind. Als Richtwert für die

vollendete Ossifikation kann man den Zeitraum zwischen dem dritten und siebenten Lebensjahr annehmen, insbesondere die zwei Synchondrosen des vorderen Atlasbogens können jedoch auch bis zum achten Lebensjahr unvollständig verknöchert sein. (9) (14) (15) (16) (17) (18)

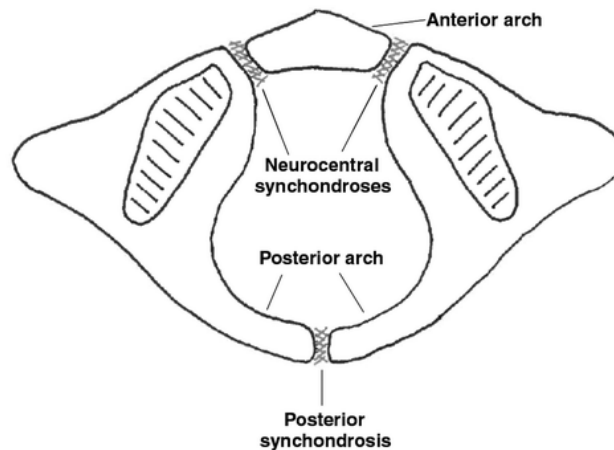


Abb. 6: Synchondrosen des Atlas

<http://www.ajronline.org/doi/full/10.2214/AJR.10.5403>

aus *AMERICAN JOURNAL OF ROENTGENOLOGY*. 2011;197: 1229-1234

1.1.3.3.1.2 Atlasassimilation

Mit einer Inzidenz von 0,25 - 0,4 % (19) handelt es sich bei der Atlasassimilation um die häufigste Malformation der Halswirbelsäule. Darunter versteht man die vollständige oder partielle Verschmelzung des Atlas mit dem Okziput. Als vollständig bezeichnet man die Fusion dann, wenn eine Abgrenzbarkeit beider Strukturen nicht mehr möglich ist, als partiell, wenn eine solche gegeben ist. Beide haben jedoch gemeinsam, dass daraus ein Funktionsverlust der *Articulatio atlantooccipitalis* resultiert. Während diese Einschränkung des Kopfgelenks durch die restliche Halswirbelsäule einigermaßen gut kompensiert wird, kann eine mit der Atlasassimilation assoziierte Verengung des *Foramen magnum* zu einer neurologischen Symptomatik führen.

Darüber hinaus können medulläre Ausfallerscheinungen ebenso durch eine begleitende Dilatation des *Ligamentum transversum atlantis* verursacht werden, da sich folglich der *Dens axis* dem Rückenmark nähert. Mit einer Inzidenz von knapp 50 % (20) ist diese relativ häufig vorkommende Komplikation nicht zu unterschätzen, da es in dieser Situation schon durch geringste Krafteinwirkungen zu verheerenden Folgen wie Paralysen und Exitus kommen kann. Die Häufigkeitsverteilung von letzteren konnten aus der Literatur

nicht erhoben werden, was wohl darauf zurückzuführen ist, dass Atlasassimilationen per se schon ausgesprochen selten vorkommen. Die zuvor beschriebene Symptomatik findet man jedenfalls auch im Falle einer basilaren Impression bzw. einem damit verbundenen Höherentreten des Dens, was ebenfalls vermehrt bei Atlasassimilationen zu beobachten ist.

Eine weitere, öfters beschriebene Komorbidität ist die Blockwirbelbildung. Darunter versteht man das Verschmelzen zweier oder mehrerer Wirbel. Meist sind dabei die Halswirbel C2 und C3 betroffen.

Trotz dieser Vielzahl an Manifestationsmöglichkeiten können die betroffenen Personen aber auch beschwerdefrei sein. (9) (19) (20)

1.1.3.3.2 Axis

Hierbei handelt es sich um den zweiten Halswirbel, er liegt somit kaudal des Atlas. Das auffälligste Merkmal des Axis ist der nach kranial gerichtete, mit dem Atlas interagierende Dens. Stabilisiert wird dieses vordere Teilgelenk durch das Ligamentum transversum atlantis, das sich zwischen den Massae laterales ausspannt und dem Dens an der Hinterseite anliegt. Bei dieser Kontaktfläche handelt es sich um das hintere Teilgelenk. Daraus ergibt sich, dass der Dens axis sowohl ventral als auch dorsal hyalinen Knorpel im Sinne einer *Articulatio atlantoaxialis mediana* aufweist.

Weitere Besonderheiten sind ein relativ kurzer Querfortsatz und ein ebenfalls gering ausgeprägter, fallweise auch nicht gegabelter Dornfortsatz. Ansonsten ähnelt der Axis weitgehend den Halswirbeln der unteren HWS. (9) (13)

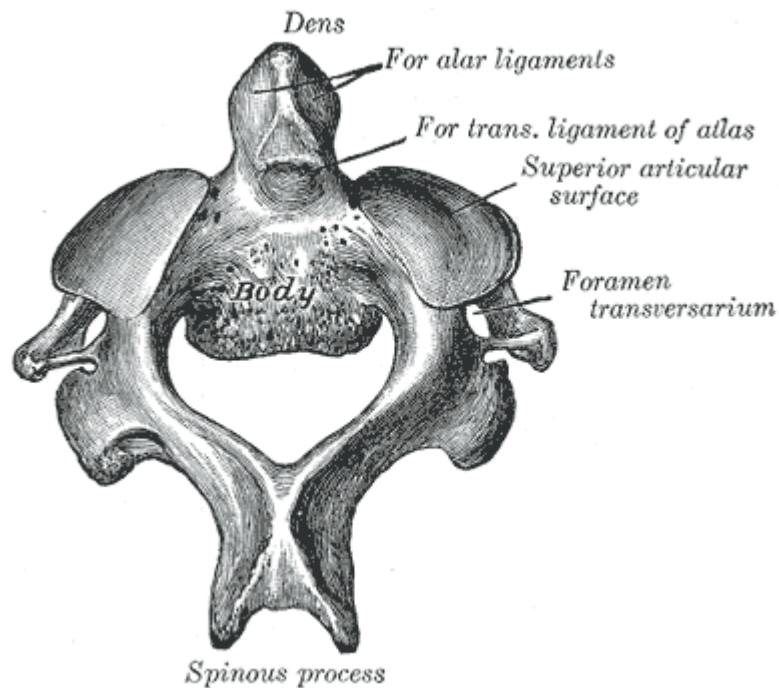


Abb. 7: Axis (C2) von kranial

<http://www.fpnotebook.com/ortho/Anatomy/CrvclSpnAntmy.htm>

aus *GRAY'S ANATOMY 20TH ED.*

1.1.3.3 Kopfgelenke

Die Kopfgelenke findet man kranial und kaudal des Atlas. Dementsprechend bezeichnet man sie als Articulatio atlantooccipitalis und Articulatio atlantoaxialis. Beide werden zu den echten Gelenken gezählt, während es sich bei den Intervertebralgelenken zwischen den restlichen Halswirbeln um unechte Gelenke handelt. Als solche verfügen sie über ein deutlich größeres Bewegungsausmaß. Dazu trägt bei, dass die Kopfgelenke keine Zwischenwirbelscheiben besitzen. Zwei weite, schlaaffe Gelenkkapseln sind ebenfalls für die Bewegungsfreiheit nötig. Voraussetzung dafür, dass sich die Bewegungen nur in einem physiologischen Ausmaß abspielen und es zu keinen Luxationen kommt, ist ein intakter Bandapparat. (9)

1.1.3.3.1 Articulatio atlantooccipitalis

Dieses Gelenk wird aus den oberen Gelenksflächen des Atlas und den Kondylen des Okziputs gebildet. Letztere besitzen eine konvexe Form und können so ideal mit den konkaven Facies articulares superiores interagieren. Es handelt sich also um ein Eigelenk bzw. Articulatio ellipsoidea.

Die Hauptfunktion dieses Kopfgelenks liegt in der Nickbewegung. Diese setzt sich aus Inklination und Reklination zusammen. Die quer liegende Achse ist im Bereich zwischen dem äußeren Gehörgang und dem Processus mastoideus lokalisiert. Daraus ergibt sich, dass bei einem Erwachsenen der Schwerpunkt des Kopfes vor der Achse liegt, während er bei einem Kleinkind aufgrund der relativ größeren Kopfmaße noch dahinter liegt. In viel geringerem Ausmaß kann es auch eine Lateralflexion und Rotation ausführen.

Inklination / Reklination	9 - 15°
Lateralflexion	4°
Rotation	4°

Tab. 2: Bewegungsausmaß der Art. atlantooccipitalis

Im Alltag werden diese Bewegungen allerdings nur im Zusammenspiel mit der übrigen HWS durchgeführt. Isolierte Bewegungen des Atlantookzipitalgelenks kommen praktisch nicht vor. (9) (12) (21)

1.1.3.3.2 Articulatio atlantoaxialis

Die Articulatio atlantoaxialis kann unterteilt werden in eine zweiteilig aufgebaute Articulatio atlantoaxialis mediana an der Vorder- und Hinterseite des Dens und den beiden Articulationes atlantoaxiales laterales, die den Zwischenwirbelgelenken der anderen Halswirbel entsprechen. Insgesamt wird dieses Gelenk also von vier Teilgelenken gebildet.

Während es leicht nachvollziehbar ist, dass die Intervertebralgelenke der HWS aufgrund ihrer Beweglichkeit eine erhöhte Neigung zur Arthrosebildung besitzen, ist es vermutlich weniger bekannt, dass es auch im Gelenk zwischen Dens und Fovea dentis im höheren Alter nicht selten zu arthrotischen Veränderungen kommt. Das lässt auf eine durchaus hohe mechanische Belastung in diesem Gelenk schließen und erklärt gleichzeitig die Verstärkung des Ligamentum transversum atlantis durch die Fasciculi longitudinales zum Ligamentum cruciforme.

Die Hauptfunktion dieses Radgelenks bzw. Articulatio trochoidea ist die Kopfdrehung. Diese wird auf beide Seiten mit je 40 - 45° angegeben. Gerade im Kindes- und Jugendalter kann ebenfalls eine geringfügige Inklination bzw. Reklination möglich sein. (9) (21) (22)

1.1.3.3.4 Bandapparat

Der Bandapparat der Halswirbelsäule besteht aus einer Vielzahl an einzelnen Bändern, die in ihrer Gesamtheit die Stabilität der HWS garantieren. Dies ist besonders bei der großen Bewegungsfreiheit der Kopfgelenke von Bedeutung. Im Falle von Bandlockerungen kann es andernfalls zu Schädigungen umliegender Strukturen wie Blutgefäße oder Nerven kommen. Besonders gravierend wäre dabei eine Verletzung des Rückenmarks. Daher ist der in unmittelbarer Nähe liegende Dens axis auch gleich mehrfach durch Bandstrukturen gesichert. (9) (12) (23)

Folgende Strukturen sind am Aufbau des Bandapparats beteiligt:

- **Lig. longitudinale anterius et posterius**
- **Ligg. interspinalia / Ligg. intertransversaria**
- **Ligg. flava**
- **Lig. nuchae**
- **Membrana atlantooccipitalis anterior et posterior**
- **Membrana tectoria**
- **Lig. cruciforme atlantis**
 - **Lig. transversum atlantis**
 - **Fasciculi longitudinales**
- **Ligg. alaria**
- **Lig. apicis dentis**

Lig. longitudinale anterius et posterius: Diese zwei Bänder verlaufen an der gesamten Wirbelsäule ventral und dorsal der Wirbelkörper entlang, wobei das hintere Längsband nur bis zum zweiten Halswirbel reichen kann, da es ja vom Atlas durch den innen liegenden Dens axis getrennt wird. Außerdem ist es nicht wie sein vorderes Gegenstück an den gesamten Wirbelkörpern, sondern nur an deren Grund- und Deckplatten, sowie den Zwischenwirbelscheiben, befestigt. Das vordere Längsband ist vergleichsweise kräftiger und schränkt die Dorsalextension der Wirbelsäule ein.

Ligg. interspinalia / Ligg. intertransversaria: Im Bereich der Halswirbelsäule nur schwach ausgebildete Bänder zwischen den Processi spinosi bzw. den Processi transversi.

Ligg. flava: Diese Bänder sind zwischen den Wirbelbögen ausgespannt. Ihre Bezeichnung ist eine Anspielung auf die gelbliche Farbe, welche auf den hohen Anteil elastischer Fasern zurückzuführen ist. Aus diesem Grund ist es auch möglich, dass diese Bänder ständig – also auch in Neutralstellung – unter Spannung

stehen und sie ihre Funktion trotzdem nicht durch Überdehnung verlieren. Diese besteht darin, die nach vorne gebeugte Wirbelsäule beim Aufrichten zu unterstützen, indem die bei der Ventralflexion stark gespannten Ligamenta flava die Normalstellung einnehmen, in der sie weniger stark gespannt sind.

Lig. nuchae: Dieses Band ist die kraniale Fortsetzung des Ligamentum supraspinale und zieht vom Processus spinosus des siebenten Halswirbels bis zur Protuberantia occipitalis externa. Von diesem Band ausgehend zieht eine Bindegewebsplatte zu den Dornfortsätzen der restlichen Halswirbel, genannt Septum nuchae. Dieses Konstrukt ist ein entwicklungsgeschichtliches Erbe und stammt aus der Zeit der Menschenaffen, welche der Bipedie noch nicht mächtig waren. Mit dessen Unterstützung konnte die normale Kopfposition aufrechterhalten werden, ohne dass dabei die Nackenmuskulatur ermüdete.

Membrana atlantooccipitalis anterior et posterior: Diese zwei Membranen entspringen an dem vorderen bzw. hinteren Atlasbogen und setzen an dem Vorderrand bzw. Hinterrand des Foramen magnum an. Während die Membrana atlantooccipitalis anterior als Fortsetzung des Ligamentum longitudinale anterius angesehen werden kann, handelt es sich bei der Membrana atlantooccipitalis posterior um ein Äquivalent der Ligamenta flava. Die Funktion liegt in der Hemmung der Dorsalextension bzw. Ventralflexion.

Membrana tectoria: Diese Membran ist die Fortsetzung des Ligamentum longitudinale posterius, zieht also von der Hinterseite des Axiskörper zum Vorderrand des Foramen magnum. Folglich hemmt es gemeinsam mit der Membrana atlantooccipitalis posterior die Ventralflexion des Kopfes. Da es sich hier um eine sehr kräftige Struktur handelt, die über den Dens axis zieht, hindert sie diesen zugleich am Zurückkippen und schützt somit ebenfalls das Rückenmark.

Lig. cruciforme atlantis: Unter dieser Bandstruktur versteht man die Einheit aus dem Ligamentum transversum atlantis und den Fasciculi longitudinales. Dabei spannt sich das Ligamentum transversum atlantis zwischen den Massae laterales des ersten Halswirbels aus, während die Fasciculi longitudinales vom Vorderrand des Foramen magnum zur Hinterseite des vorderen Wirbelbogens von C2 ziehen. Es liegt also zwischen dem Dens axis und der Membrana tectoria. Aufgrund der beinahe gleichen Lage wie die Membran hat es auch die identen Funktionen wie diese, nämlich die Hemmung der Ventralflexion des Kopfes und den Schutz des Rückenmarks. Dies geschieht, indem es den Dens axis in die Fovea dentis drückt.

Ligg. alaria: Diese Bänder ziehen vom Dens axis zum seitlichen Rand des Foramen magnum. Sie sind sehr zugfest und leisten ihren Beitrag zur Stabilisierung der Kopfgelenke, indem sie den Dens immer im Zentrum halten. Dafür sorgen sie auch in Ruheposition, was darauf schließen lässt, dass Anteile davon auch in neutraler Kopfhaltung gespannt sind. Wesentliche Funktionen sind weiters die Hemmung der Kopfdrehung und der Seitwärtsbewegung. Außerdem wirken sie auch der Ventralflexion des Kopfes entgegen. Aufgrund dieser Vielfalt an Bewegungseinschränkungen sind die Bänder prädisponiert für Schädigungen im Rahmen von Beschleunigungsverletzungen. So werden sie bei Schleudertraumen in ca. einem Drittel der Fälle in Mitleidenschaft gezogen. Da es aufgrund ihrer Stabilität dafür einer relativ großen Krafteinwirkung bedarf, ist deren Abriss häufig ein Indiz für knöcherne Verletzungen.

Lig. apicis dentis: Dieses Band zieht von der Spitze des Dens axis bis zum Vorderrand des Foramen magnum. Vom Verlauf her hätte es die Funktion, die Ventralflexion des Kopfes zu hemmen. Doch ist es so zart ausgebildet, dass es vom mechanischen Standpunkt aus betrachtet keine Funktion aufweist.

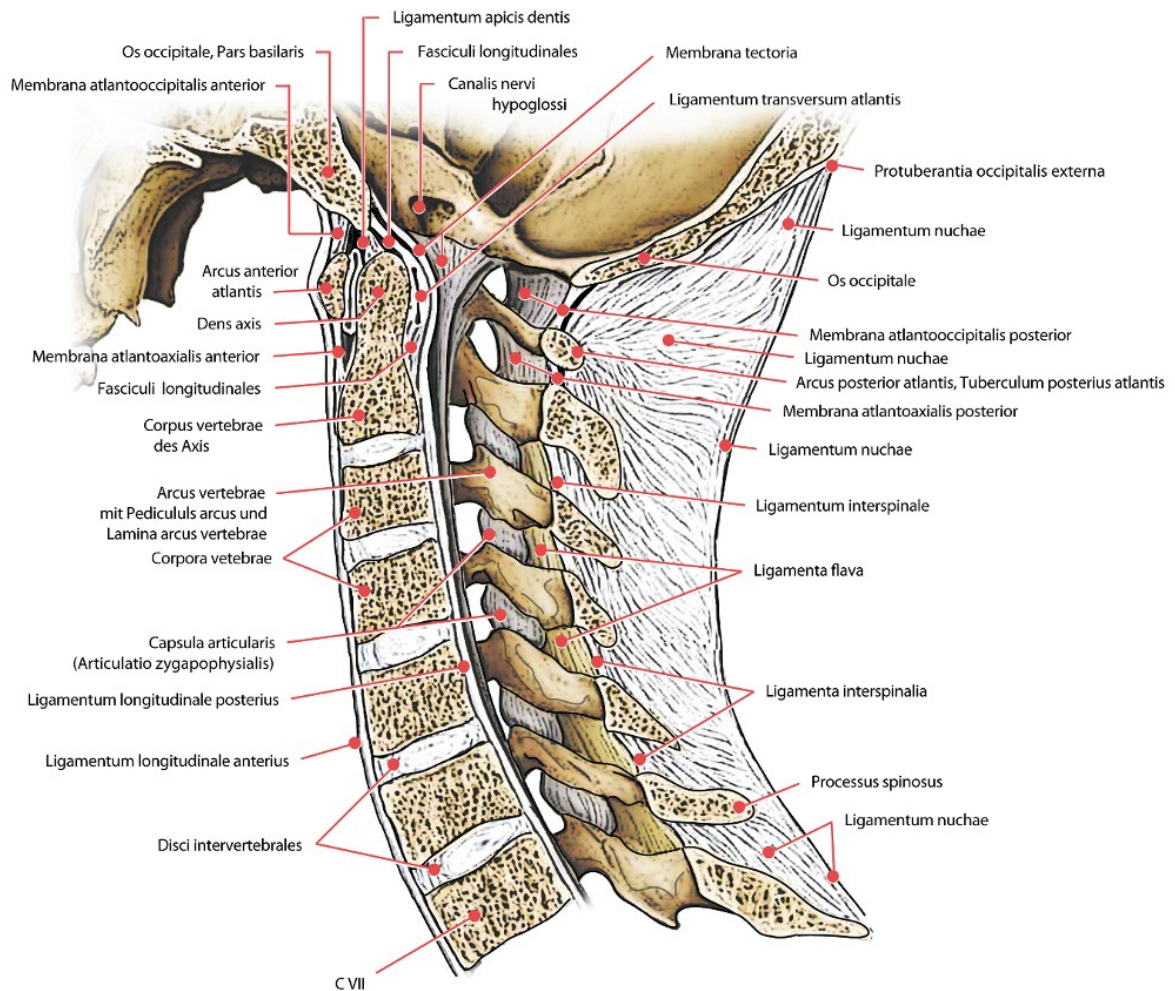


Abb. 8: Bandstrukturen der Halswirbelsäule

<http://www.kopfgelenke.org>

1.1.3.3.5 Arteria vertebralis

Die Arteria vertebralis ist beidseitig angelegt und gemeinsam mit der Arteria carotis interna für die Versorgung des Gehirns, sowie des Hör- und Gleichgewichtsorgans, zuständig. Deshalb kann eine Verletzung dieses Gefäßes eine akute Lebensbedrohung darstellen und im Falle des Überlebens mit einer massiv verminderten Lebensqualität (u.a. Hirnnervenausfälle, periphere Lähmungen, Schwindel, Gang-, Seh-, Riech- und Sprachstörungen) einhergehen. Läsionen entstehen dabei entweder durch die Traumen selbst oder aber durch darauffolgende operative Eingriffe. Genaue Kenntnis über Verlauf und Lage dieser Arterie ist daher von besonderer Bedeutung. Präoperativ wird diese anhand einer Computertomographischen Angiographie (CTA, CT-Angiographie) gewonnen. (9) (24) (25)

Entsprechend ihrem Verlauf können vier Abschnitte unterschieden werden:

- **Pars praevertebralis**
- **Pars transversaria**
- **Pars atlantica**
- **Pars cranialis**

Verlauf: Die Arteria vertebralis geht als erster Ast der Arteria subclavia ab und zieht folglich nach kranial, bis sie vor dem Processus transversus des siebten Halswirbels liegt (**Pars praevertebralis**). Anschließend läuft sie durch das Foramen transversarium des sechsten Halswirbels und steigt so auch weiter bis zum Atlas auf. In 40 % der Fälle tritt sie erst kranial des C6 in ein Foramen transversarium ein (**Pars transversaria**). In weiterer Folge zieht sie nach dorsal über den hinteren Atlasbogen und durchbricht gemeinsam mit dem Nervus suboccipitalis die Membrana atlantooccipitalis posterior. In diesem Abschnitt verläuft die Arterie schlingenförmig, um bei extremen Kopfbewegungen nicht überstrapaziert zu werden (**Pars atlantica**). Schlussendlich zieht sie wieder nach ventral und passiert das Foramen magnum. Kurz darauf treffen die Arteriae vertebrales beider Seiten aufeinander und vereinigen sich zur Arteria basilaris (**Pars cranialis**). (9)

Kommt es zu einer Verletzung der Arteria vertebralis, so muss die Blutung rasch gestoppt werden (z.B. mit Coils), da ansonsten aufgrund der Anastomose eine Strömungsumkehr stattfindet und somit das von der intakten Arteria vertebralis geförderte Blut zur Arteria basilaris, dann jedoch nicht in die weiterführenden Gehirngefäße, sondern aufgrund des Blutdruckabfalls in der verletzten Arteria vertebralis retrograd in dieses Gefäß zurückfließt. Die Folge ist ein Ausfall der Blutzufuhr entsprechend ihrem Versorgungsgebiet. Da bei Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr nach ca. 10 - 15 Minuten (26) der Hirntod eintritt, ist das auch der Grund, warum der Spielraum für die Wiederherstellung des Blutflusses nur wenige Minuten beträgt. (27)

Zu einer noch größeren Herausforderung wird eine Operation, wenn zusätzliche Risikofaktoren wie eine Hypoplasie oder Stenosen bzw. Okklusionen der Arteria vertebralis vorhanden sind.

Bei Stenosen liegt das Problem darin, dass sie im Falle eines beidseitigen Auftretens eine herabgesetzte Hirnversorgung bedingen. Folglich wird bei einer Unterbrechung des Blutflusses die Toleranzgrenze schneller erreicht als bei einer physiologischen Durchflussmenge. Ungeachtet der Ursache (z.B. Osteophyten, Operationstraumata) äußert sich eine Minderversorgung je nach betroffenem Areal durch Sehstörungen, Tinnitus, Nystagmen und Riechstörungen. Da ebenso das Gleichgewichtsorgan betroffen sein kann, manifestiert sich diese Problematik häufig auch mit Schwindel, der wiederum zu Gangstörungen, Übelkeit und ev. sogar Erbrechen, führt. (12) (25) (24)

Kommt es im Rahmen einer Jefferson-Fraktur zu einer Okklusion der Arteria vertebralis, so hat die Erhaltung der intakten kontralateralen Arterie oberste Priorität. Bei operativem Vorgehen sollte also sowohl auf Pedikel- und transartikuläre Schrauben als auch auf Massa-lateralis-Schrauben verzichtet werden, um die intakte, blutfördernde Arterie unter keinen Umständen zu gefährden. (28)

Diese Gefahr der Unterversorgung besteht bei einer Hypoplasie nicht, da sich im Regelfall die kontralaterale Arterie adaptiert hat und mehr Blut fördert. Bei extremer Ausprägung kann deshalb sogar eine vermehrte Pulsabilität am Hals erkennbar sein, die dabei der Kompensation der Hypoplasie dient und nicht als pathologisch zu werten ist. Kritisch wird diese Situation erst, wenn es zu einer Schädigung der hauptzuführenden Arterie, z.B. im Rahmen eines operativen Eingriffs, kommt. Dann ist nämlich keine ausreichende Hirnversorgung über die Vertebralarterien (die ja fusionieren und gemeinsam die Arteria basilaris bilden) mehr gegeben, da durch das intakt gebliebene, hypoplastische Gefäß alleine nicht genug Blut transportiert werden kann. Tritt der umgekehrte Fall ein, dass das hypoplastische Gefäß verletzt wird und die hauptzuführende Arterie unversehrt bleibt, ist eine adäquate Hirnversorgung gewährleistet. (29) (30) (31) (27)

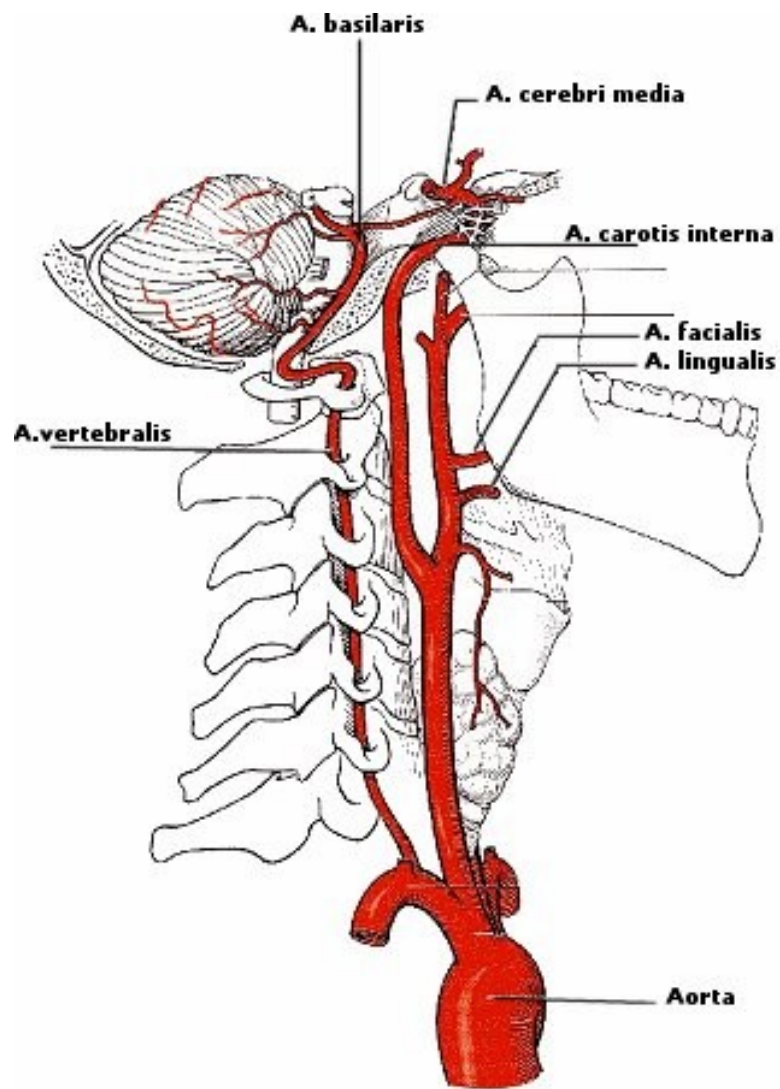


Abb. 9: Verlauf der A. vertebralis

<http://www.darknumina.de/stage/pi5/index.html>

1.2 Jefferson-Fraktur

1.2.1 Definition

Heutzutage gilt die Jefferson-Fraktur als Synonym für den Berstungsbruch des Atlas. Namensgebend dafür war *Sir Geoffrey Jefferson (1886-1961)*, britischer Neurologe und Neurochirurg. Dank seiner bahnbrechenden Erkenntnisse kam es seinerzeit zu einer bedeutenden Entwicklung auf dem Gebiet der Neurochirurgie, die auch über die Grenzen Großbritanniens hinweg für reges Interesse sorgte. (32)

1.2.2 Klassifikation nach Jefferson (1920)

Bezüglich der Form des Atlas fiel *Jefferson* auf, dass der hintere Atlasbogen dünner als der vordere war. Daraus folgerte er, dass bei mäßiger Krafteinwirkung der Wirbel zu einem isolierten Bruch des hinteren Bogens tendiert, während er bei stärkeren Kräften zum Berstungsbruch in vier Bruchstücke (*four-part-fracture*) neigt. Bei letzterem sind also sowohl der vordere als auch der hintere Atlasbogen, jeweils mit zwei Frakturstellen, betroffen. Obwohl *Jefferson* nur diese eine Art von Berstungsbruch beschrieben hat, wird heute neben der *four-part-fracture* auch die *two-part-fracture* und die *three-part-fracture* des Atlas als Jefferson-Fraktur bezeichnet. Laut manchen Autoren treten diese zwei Frakturtypen sogar häufiger auf als die ursprünglich von *Jefferson* beschriebene. (32) (5) (33) (34) (18)

1.2.3 Klassifikationen im Überblick

Basierend auf dieser *Klassifikation nach Jefferson (1920)* entwickelten sich im Laufe der Zeit mit der Modernisierung der bildgebenden Verfahren weitere, genauere Einteilungen von Atlasfrakturen, die auch heute noch gebräuchlich sind. Als Beispiele sind die *Klassifikation nach Gehweiler (1976)*, die *Klassifikation nach Dickman (1990)* und die *Klassifikation nach Levine-Edwards (1991)* angeführt. (5) (35) (36)

Typ I	Isolierte Fraktur des hinteren Atlasbogens
Typ II	Komplexfraktur unter Einbeziehung des vorderen und hinteren Atlasbogens

Tab. 3: Klassifikation nach Jefferson (1920)

Typ I	Isolierte Fraktur des vorderen Atlasbogens
Typ II	Isolierte Fraktur des hinteren Atlasbogens
Typ III	Kombinierte Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens mit Einriss des Ligamentum transversum
Typ IV	Isolierte Fraktur der Massa lateralis
Typ V	Fraktur des Processus transversus

Tab. 4: Klassifikation nach Gehweiler (1976)

Typ A	Mehrfachfraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens (Jefferson-Fraktur)
Typ B	Fraktur einer Massa lateralis mit Abriss des Ligamentum transversum
Typ C	Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens, unilateral
Typ D	Fraktur einer Massa lateralis ohne Abriss des Ligamentum transversum
Typ E	Fraktur des hinteren Atlasbogens
Typ F	Fraktur des vorderen Atlasbogens
Typ G	Diagonaler Frakturverlauf durch vorderen bzw. hinteren Atlasbogen

Tab. 5: Klassifikation nach Dickman (1990)

Typ I	Extraartikuläre Fraktur oder Fraktur des Processus transversus
Typ II	Isolierte Fraktur des vorderen Atlasbogens
Typ III	Isolierte Fraktur des hinteren Atlasbogens
Typ IV	Frakturen der Massa lateralis
Typ V	Berstungsfrakturen, 3 oder mehr Fragmente

Tab. 6: Klassifikation nach Levine-Edwards (1991)

1.2.4 Ätiologie

Voraussetzung für die Entstehung einer Jefferson-Fraktur ist eine axiale Krafteinwirkung. Daraus resultiert eine Einklemmung des Atlasrings zwischen den oberen Gelenkflächen des Axis und den Kondylen des Okziputs. In weiterer Folge kommt es im Atlas zu einer Umwandlung der Kompressions- in Distraktionskräfte. Diese bewirken, dass der Wirbel im Sinne einer four-part-fracture gesprengt und die Bruchstücke entsprechend der anatomischen Gegebenheiten (im Querschnitt hat der Atlasring die Form eines mit der Spitze nach innen liegenden Dreiecks) und des Gewichts des Kopfes nach außen gedrängt werden. Begünstigt wird das Frakturgeschehen durch das Fehlen der Bandscheiben zwischen C0/C1 und C1/C2, da aufgrund der damit wegfallenden „Stoßdämpfer-Wirkung“ die einwirkenden Kräfte direkt auf den Knochen übertragen werden. Dislokationsgeschehen werden dadurch ebenfalls gefördert. Wäre die Halswirbelsäule in diesem Bereich stabiler, würde das auf Kosten der Beweglichkeit gehen. (33) (37) (5)

Während es sich bei der Jefferson-Fraktur in der Regel also um ein Stauchungstrauma handelt, treten unilaterale Frakturen meist durch andere Verletzungsmechanismen auf. So werden isolierte Brüche des hinteren Atlasbogens durch Extensionstraumen verursacht und einseitige Frakturen der Massa lateralis entstehen durch seitliche Krafteinwirkung, wobei es bei zusätzlichem Zug durch die Halsmuskulatur auch zu einer isolierten Fraktur des Processus transversus kommen kann. Diese Punkte lassen im Rahmen einer Anamnese eine erste Vermutung über die vorliegende Verletzung der oberen HWS zu, als beweisend sind jedoch nur bildgebende Verfahren anzusehen. (34)

Aus den verschiedenen Fallberichten über Jefferson-Frakturen ist ersichtlich, auf wie vielfältige Weise die ursächliche axiale Gewalteinwirkung zustande kommen kann. Bei Erwachsenen ist diese häufig im Rahmen von Verkehrsunfällen sowie dem Fall aus geringer Höhe anzutreffen. Andererseits können aber auch Stürze, die im ersten Augenblick völlig belanglos erscheinen, die Ursache für Jefferson-Frakturen sein. So erlitt ein 62-jähriger Mann diesen Bruch lediglich aufgrund eines Ausrutschers mit Landung auf dem Rücken, wobei er mit dem Nackenbereich als erstes aufschlug. Bei einem nicht alltäglichen Fall zog sich eine Person sogar im Rahmen einer Tanzeinlage diese Verletzung zu. (38) (33) (3)

Im Kindesalter handelt es sich bei den Kopfüber-Stürzen aus geringer Höhe um die häufigste Unfallursache. Diesbezüglich werden sowohl Fensterstürze aus dem Parterre oder dem ersten Stock, als auch Stürze über Stiegen und von Klettergerüsten genannt. Kopfsprünge in zu seichtes Wasser sind ebenfalls dokumentiert. Im Jugendalter kommen mit den Stürzen beim Moped fahren und Skateboarden zwei weitere typische Ursachen hinzu. (18) (38)

1.2.5 Inzidenz

Im Allgemeinen treten Atlasfrakturen eher in einem jüngeren Patientenkollektiv (Durchschnittsalter: 30 Jahre) auf und machen 2 % (39) aller Wirbelsäulenverletzungen, 7-10 % (1) (39) aller Halswirbelsäulenverletzungen und 25 % (39) aller Verletzungen im atlantoaxialen Bereich aus. In bis zu 44 % (1) der Fälle findet man eine zusätzliche Fraktur des Axis. (28) (39) (1)

Laut *Abeloos et al.* variiert die Häufigkeit von Jefferson-Frakturen zwischen 3-13 % aller Verletzungen der Halswirbelsäule. *Bransford et al.* geben die häufigsten Frakturtypen des Atlas, nämlich Jefferson-Fraktur, isolierter Bruch des hinteren Bogens und die Trümmerfraktur einer *Massa lateralis*, mit jeweils 20-30 % aller Atlasverletzungen an. (40) (28)

AuYong et al. machen darauf aufmerksam, dass ihrer Ansicht nach Jefferson-Frakturen im Kindesalter häufig übersehen werden. Sie führen diese Behauptung auf die problematische Diagnosestellung aufgrund der noch vorhandenen Wachstumsfugen und der Tatsache zurück, dass im Kindesalter die Symptome bei Jefferson-Frakturen zunächst nur von kurzer Dauer sind und sich gut mit unspezifischen Therapien behandeln lassen. So wurde der Fall einer 5-jährigen Patientin geschildert, die 36 Stunden nach Anlage einer Halskrause beschwerdefrei nach Hause entlassen worden war, mit der Anweisung, die Orthese weiterzutragen. Als bei ihr nach 2 Wochen wegen intermittierenden Kopf- und Nackenschmerzen erneut ein CT gemacht wurde, stellte sich aufgrund einer leichten Verschiebung der vermeintlichen Synchondrose heraus, dass es sich bei der Aufhellungslinie doch um einen Frakturspalt handeln musste. (18)

Kakarla et al. ergänzen zu dieser Thematik, dass Berstungsbrüche des Atlas am häufigsten isoliert auftreten und folglich nur selten neurologische Defizite zu erwarten sind, da die Frakturfragmente aufgrund der Form des Atlaswirbels die Tendenz haben, sich vom Rückenmark zu entfernen - vorausgesetzt, dass es keine Begleitverletzungen der HWS gibt. (38) (39)

1.2.6 Begleitverletzungen

Grundsätzlich sind Begleitverletzungen im kraniozervikalen Übergangsbereich bei Jefferson-Frakturen nur in ca. einem Drittel der Fälle und damit seltener anzutreffen als bei isolierten Frakturen des hinteren Atlasbogens. In der Literatur findet man diesbezüglich Werte zwischen 23,5 % - 37,5 %. (41) (42) (43) Dies ist darauf zurückzuführen, dass es bei Berstungsbrüchen durch die axiale Krafteinwirkung zu geringerer Verschiebung der Knochenfragmente kommt bzw. diese eben aufgrund ihrer Form und des Gewichts des Kopfes die Tendenz haben, sich vom Rückenmark zu entfernen. (38) (39) (37)

Eine wichtige Aussage in diesem Zusammenhang ist aber wohl jene, dass bei Jefferson-Frakturen immer die gesamte HWS konkret auf Begleitverletzungen überprüft werden soll. Speziell die untere Halswirbelsäule wird auf Röntgenbildern, auf denen als Blickdiagnose ein Berstungsbruch des Atlas feststellbar ist, nicht selten vernachlässigt. Es ist jedoch ein grober Fehler, anzunehmen, dass Jefferson-Frakturen nicht auch mit Begleitverletzungen der unteren HWS einhergehen können. (44) (45)

Bei den ligamentären Begleitverletzungen gilt die Faustregel, dass bei axialer Gewalteinwirkung die Ligamenta alaria, die Membrana tectoria und die Gelenkkapseln zwischen C1/C2 intakt bleiben – vorausgesetzt, dass es zu keiner Fraktur der Kondylen gekommen ist. Wenn es doch zu einer Ruptur kommt, so sind als erstes die Ligamenta alaria betroffen. Das ist darauf zurückzuführen, dass diese Bänder einen besonders hohen Anteil an undehnbaren kollagenen Fasern besitzen, was eine erniedrigte Zugkraft von max. 240 N (vgl. Kreuzbänder bis zu 800 N) (11) zur Folge hat. Diese Behauptung deckt sich mit einem

Fallbericht von *Ruf et al.*, in dem als ligamentäre Begleitverletzung lediglich die Ruptur des linken Ligamentum alare angeführt wurde. (38) (11) (3)

Bei den knöchernen Begleitverletzungen dominiert ganz klar die Kombinationsfraktur mit Abbruch des Dens axis. In den drei von *Gleizes et al.* beschriebenen Fällen, in denen Jefferson-Frakturen mit Begleitverletzungen auftraten, betrafen zwei (66 %) den Dens. Hierbei sind besonders ältere Personen aufgrund der verminderten Knochendichte betroffen. Auch der Nackenschmerz als Leitsymptom tritt bei ihnen überdurchschnittlich häufig auf. (4) (38) (43) (45)

Jefferson selbst gab den Anteil von Densfrakturen an allen Atlasfrakturen mit min. 26 % an. Zieht man nur die komplizierten Frakturen für die Berechnung heran - also die isolierten Atlasfrakturen ausgenommen -, beträgt der Anteil min. 38 %. (46)

Weiters erwähnten *Ruf et al.* in Fallberichten eine Fraktur von C5 und eine von C7, *Tan et al.* einen Bruch der Lamina von C2 und *AuYong et al.* beschrieben neben der Jefferson-Fraktur eine zusätzliche Fraktur der mittleren Schädelgrube bei gleichzeitiger Verschiebung der linken Synchondrose des Atlas. Begleitend bei derartigen Gewalteinwirkungen ist verständlicherweise auch oft ein Schädelhirntrauma. (3) (47) (18) (44)

1.2.7 Einteilung

Das entscheidende Kriterium bei jeder Jefferson-Fraktur ist die Frage nach der Stabilität, da sich die Therapie maßgeblich nach dem verbliebenen Stabilitätsgrad richtet. Demnach unterscheidet man also zwischen stabilen und instabilen Berstungsbrüchen. Instabile Frakturen sind dabei die ungünstigere Variante, da es bis heute keine Einigkeit darüber gibt, wie man diese Verletzungen am besten therapiert. Im Regelfall werden sie operativ behandelt, was in einer so sensiblen Region immer ein gewisses Risiko darstellt. (5) (33) (37) (3) (41)

Die Unterscheidung, ob es sich um einen stabilen oder instabilen Bruch handelt, hängt davon ab, ob die Integrität des Ligamentum transversum atlantis erhalten wurde. (Der von *Bransford et al.* beschriebene Sonderfall einer unilateralen, sagittalen Splitterfraktur der Massa lateralis muss hierbei ausgenommen werden. Trotz eines intakten Ligamentum transversum atlantis handelt es sich bei diesem speziellen Frakturtyp um eine instabile Jefferson-Fraktur, da aufgrund der sagittal gespaltenen Massa lateralis nur das mediale Frakturfragment vom Ligamentum transversum atlantis in Position gehalten werden kann. Der laterale Anteil der Massa lateralis gibt unter dem Druck des Okziputs nach, subluxiert folglich nach lateral und bedingt dadurch ein einseitiges Absinken des Okziputs.) Aufgrund seines Verlaufes hat dieses Band einerseits die Tendenz, dem Auseinanderweichen der Massae laterales entgegenzuwirken, und andererseits, die Entfernung des vorderen Atlasbogens vom Dens axis zu verhindern, was den Sinn hat, dass damit der Atlas gegenüber dem Axis nicht nach ventral kippen kann. Kommt es nun zur Ruptur dieses Ligamentums, kann es diese Funktionen nicht mehr übernehmen. *Dickman et al.* unterscheiden hierzu zwei Arten von Bandläsionen: Während es sich bei der *Typ-1-Verletzung* um eine Zerreißung des Bandes im Wirbelkanal handelt, spricht man bei einem knöchernen Ausriss der Ansatzstelle des Ligamentums von einer *Typ-2-Verletzung*. (3) (33) (28) (48)

Nun ist es jedoch so, dass die Stabilität durch ein rupturiertes Ligamentum transversum atlantis nicht in allen Fällen vollständig verloren geht - d.h. manche instabile Frakturen sind stabiler als andere instabile Frakturen. Die Ausprägung dieses Bandes ist individuell verschieden, wodurch sich auch unterschiedliche Resistenzen und Belastbarkeiten ergeben. Gleichzeitig bedeutet dies, dass es auch andere Faktoren geben muss, die bei der Stabilität eine Rolle spielen, da jeder gesunde Mensch über eine stabile HWS verfügt. Nach heutigem Wissen zählt man dazu die Ligamenta alaria und die Gelenkkapseln der Facettengelenke. Bleiben sie intakt, kann trotz eines gerissenen Ligamentum transversum atlantis ein gewisses Maß an Stabilität erhalten sein. So berichteten *Brian et al.* von einem Patienten, bei dem die Massae laterales auseinandergewichen sind - ein Instabilitätskriterium -, der Abstand zwischen vorderen Atlasbogen und Dens jedoch trotzdem nicht mehr als 3 mm ausmachte, was bei einem Erwachsenen als oberer Normbereich (49) angesehen wird und damit als Zeichen für eine vorhandene Stabilität gewertet werden kann. (33) (38) (49)

Gleichzeitig ist aber auch zu bedenken, dass es bei ausgeprägter Dislokation der Frakturteile zur Absenkung des Okziputs kommen kann, wodurch die intakten, vertikal verlaufenden Bänder ebenso ihre Funktion verlieren, da sie folglich nicht mehr unter Spannung stehen. Nach dem gleichen Prinzip können auch anfänglich geringe Instabilitäten ohne adäquate Therapie durch sekundäre Dislokation der Bruchstücke an Ausmaß zunehmen und in weiterer Folge sogar zu Subluxationen führen. Dazu präsentierten *Bransford et al.* drei Fälle mit einseitigem, sagittalem Splitterbruch einer Massa lateralis. Obwohl die Frakturfragmente zu Beginn nur als minimal verschoben beschrieben wurden, entwickelten sich daraus kraniozervikale Deformitäten. Im Nachhinein wusste man also, dass dieser Frakturtyp trotz seines unspektakulären Erscheinungsbilds von Anfang an als instabil klassifiziert hätte werden müssen. (37) (33) (4) (28)

Panjabi et al. ermittelten hingegen an zehn frischen Leichen das Verletzungsmuster des Ligamentum transversum atlantis, nachdem es einer axialen Kraft von durchschnittlich 3,050 N ausgesetzt wurde. Ihre Resultate zeigten, dass es in 8 Fällen (80 %) zu einem Funktionsverlust des Bandes kam. Dabei handelte es sich in 4 Fällen (50 %) um einen knöchernen Ausriss, in 1 Fall (12,5 %) um einen partiellen knöchernen Ausriss und in 3 Fällen (37,5 %) riss das Ligamentum im Wirbelkanal. In 6 Fällen (75 %) kam es überdies zu einer Jefferson-Fraktur. (50)

1.2.8 Klinisches Erscheinungsbild

Grundsätzlich gehen Jefferson-Frakturen nicht mit spezifischen Symptomen einher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wirbelbruchstücke aufgrund ihrer im Querschnitt dreieckigen Form die Tendenz haben, sich vom Wirbelkanal - und damit vom Rückenmark - zu entfernen und die Arteriae vertebrales in den Foramina transversaria stets von den Querfortsätzen geschützt werden. Folglich findet man nur einen Nacken- bis subokzipitalen Schmerz, der dafür jedoch sehr ausgeprägt sein kann. (39) (38) (4) (5)

Bei einer ausgeprägten Dislokation der Frakturteile bzw. aufgrund des Nachgebens der frakturierten Massae laterales kann es durch das Absinken des Okziputs allerdings zu einer Kopffehlstellung kommen. Während bilaterale Brüche dabei eine gleichmäßige Annäherung der Kondylen an die oberen Gelenkflächen

des Axis zur Folge haben, entsteht bei unilateraler Berstung der Massa lateralis eine Schiefelage des Kopfes. Jegliche Bewegungen in den oberen Kopfgelenken (Flexion, Extension, Lateralflexion, Rotation) sind dann nur mehr mit heftigsten Schmerzen oder überhaupt nicht mehr möglich – abgesehen davon, dass sich auf diese Weise der Dens axis dem Foramen magnum nähert und damit eine Gefahr für die Einklemmung der Medulla oblongata darstellt. (28) (16)

Neurologische Auffälligkeiten nach einem Berstungsbruch des Atlas sind selten - vorausgesetzt, es handelt sich nicht um eine Kombinationsfraktur (39) (1) (41) (51) (38) (3) (33). Wenn sie jedoch in Erscheinung treten, können sie sich auf verschiedene Weise manifestieren. Liegt der bereits erwähnte Fall vor, dass der Dens axis die Medulla oblongata schädigt, kann daraus ein Ausfall der Hirnnerven IX - XII resultieren. Ein Beispiel dafür wäre ein von *Brian et al.* beschriebener Patient, dem am Tag nach der Jefferson-Fraktur unter anderem auffiel, dass sich seine Stimme verändert hat. Weitere Symptome, die auf eine mögliche Läsion dieser Nerven hindeuten, wären beispielshalber das „Kulissenphänomen“, der Verlust des Würgereflexes oder eine Störung des Geschmacksinnes. Letztere ist aber nur auf das hintere Zungendrittel beschränkt, da die vorderen zwei Drittel von der Chorda tympani versorgt werden. (16) (34) (33) (9)

Ebenso wurden in der Literatur auch Neuropathien in Form von ziehenden Schmerzen, Hypästhesien und Sensibilitätsausfällen in den Versorgungsgebieten der Nervi occipitales major und minor beschrieben, welche sich über die Hinterhauptsgegend erstrecken. Die Folgen so eines irritierten Nervens, sowie auch anderer neurologischer Mikrotraumen, bedürfen unter normalen Umständen keiner Therapie und heilen ohne Zutun wieder ab. (16) (9) (33) (52)

Trotzdem sei abschließend noch einmal erwähnt, dass der Mehrheit der Betroffenen weder unmittelbar nach der Fraktur noch im weiteren Verlauf neurologische Probleme widerfahren.

Ebenfalls selten auftretend, und das vor allem bei besonders lateralen Frakturen, sind einseitige Läsionen und Thrombosen der Arteria vertebralis. (34) Da es sich hierbei um eine sehr spezielle Thematik handelt, sind die Häufigkeitsangaben in der Literatur dementsprechend spärlich. Bezüglich Komplikationen der Arteria vertebralis im Zusammenhang mit Traumata der HWS findet man Inzidenzen von 7,1-13 % (53) (54), was die Frage aufwirft, ob jene im Zusammenhang mit Jefferson-Frakturen aufgrund der anatomischen Besonderheiten des Atlas tatsächlich vergleichsweise selten auftreten oder doch unterdiagnostiziert sind.

Inbesondere bei schwach ausgebildetem Circulus arteriosus cerebri Willisii, einem arteriellen Anastomosenring im Gehirn zur zusätzlichen Absicherung dessen Versorgung, manifestieren sich diese Komplikationen anhand einer Kleinhirn- und Hirnstammsymptomatik. Man spricht hierbei von einer vertebrobasilären Insuffizienz. Sie ist gekennzeichnet durch Hörstörungen, Tinnitus, Sehstörungen und Drehschwindel. (34) (5) (9) (55) (56) (24)

Diesbezüglich beschrieb schon *Wallenberg* im Jahre 1895 ein Syndrom, dessen Ätiologie er in einer arteriellen Unterversorgung bestimmter Gehirnareale vermutete. Konkret ging es dabei um ein vielfältiges neurologisches Erscheinungsbild, bestehend u.a. aus heftigen Drehschwindelattacken mit Erbrechen, ipsilateralen Sensibilitätsausfällen im Gesicht, kontralateralen Sensibilitätsausfällen am restlichen Körper, einem ipsilateralen Horner-Syndrom, einer ipsilateralen Hemiataxie, einem ipsilateralen Kulissenphänomen sowie Schluck- und Sprechstörungen. Bewusstlosigkeit tritt dabei in der Regel nicht auf. *Wallenberg* identifizierte als Ursache dieser Phänomene ein Infarktgeschehen der Medulla oblongata, hervorgerufen durch einen verminderten Blutfluss in der Arteria cerebelli inferior posterior. Spätere Erkenntnisse zeigten, dass diese Symptomatik viel häufiger auf Stenosen bzw. Verschlüsse der Arteria vertebralis, die große Teile

der Medulla oblongata versorgt, zurückzuführen ist. Nichtsdestotrotz spricht man aber auch in diesen Fällen von einem Wallenberg-Syndrom, ebenso wenn die Blutzufuhr traumatisch bedingt unterbrochen wird, wie es eben im Rahmen von Jefferson-Frakturen der Fall sein kann. (57) (58)

Mit einiger Verzögerung (ca. 6 Stunden) (39) kommt es nach Jefferson-Frakturen schließlich zur Entstehung eines Ödems. Dieses kann solche Ausmaße annehmen, dass es den Oesophagus und die Trachea einengt, was sich klinisch mit Schluckbeschwerden und Atemnot bemerkbar macht. (34)

1.2.9 Akutmaßnahmen bei HWS-Traumen

Kommt man zu einem Verunfallten, bei dem ein Trauma der Halswirbelsäule vermutet wird, ist es sehr wichtig, dass man im Rahmen der Erstversorgung keine sekundären Rückenmarksverletzungen verursacht. Diese können infolge von Wirbelbrüchen entstehen, wenn Frakturfragmente durch aktive oder passive Bewegung in der betroffenen Region derartig verschoben werden, dass es in weiterer Folge zu einer Myelonkompression kommt. Um das zu verhindern, muss man darauf achten, dass weder Dreh- noch Beugebewegungen durchgeführt werden. Die ideale Kopfhaltung in dieser Situation ist jene, bei der der Kopf leicht nach dorsal ausgerichtet ist. Auch durch die Ausübung einer geringen Zugkraft am Kopf und der damit verbundenen Streckung der Halswirbelsäule wird die Wahrscheinlichkeit für eine sekundäre Rückenmarksverletzung vermindert. All diese Punkte sind bei Verdacht auf eine Halswirbelsäulenverletzung so lange einzuhalten, bis diese im Krankenhaus durch bildgebende Verfahren widerlegt ist – also auch während des Transports dorthin. Unter optimalen Umständen findet dieser mit einer pneumatischen Matratze statt. Aus den bereits erwähnten Gründen sollten die Umlagerungen dabei ebenfalls nur in longitudinaler Richtung erfolgen. (59)

Bei Leichtverletzten wird die Halswirbelsäule zunächst auf Mobilität, Ruhe-, Stauchungs- und Bewegungsschmerz hin evaluiert. Neurologisch sind Sensibilitätsstörungen und Lähmungserscheinungen in den oberen und unteren Extremitäten zu erheben, in der oberen Extremität weiters auf ausstrahlende Schmerzen zu achten. Liegt anschließend der Verdacht einer HWS-Verletzung vor, ist eine Standard-Röntgenaufnahme in 2 Ebenen indiziert. (44) (59)

1.2.10 Diagnostik

1.2.10.1 Anamnese

Einer der wichtigsten diagnostischen Schritte ist die Erhebung der Anamnese. Dadurch kann sich der Untersucher ein Bild des Unfallhergangs machen, zugleich abschätzen, ob besondere Gegebenheiten vorliegen und worauf er sein Augenmerk speziell legen muss, und so zielgerichtet das weitere Prozedere bestimmen. Sollte es dem Patienten selbst nicht möglich sein, über den Unfallhergang Auskunft zu geben, kann sie auch fremdanamnestisch (z.B. durch Unfallzeugen, Ersthelfer) erhoben werden. (60) (61)

Folgende Punkte sollte jede Anamnese beinhalten:

- 1) Genauer Zeitpunkt, Art und Richtung der Gewalteinwirkung
- 2) evtl. vorhandener Kopfschutz
- 3) Erinnerung an das Unfallereignis und davor liegende Zeit, retrograde Amnesie
- 4) Erinnerung im Anschluss an den Unfall, antegrade Amnesie
- 5) Erbrechen

1.2.10.2 Inspektion / Palpation

Im Rahmen *der Inspektion* wird auf Auffälligkeiten im Bereich der Halswirbelsäule sowie auf Fehlstellungen des Kopfes - entsprechend der bereits geschilderten Klinik - geachtet. Anhand von Prellmarken können sowohl das Ausmaß der Gewalteinwirkung als auch Art und Wahrscheinlichkeit von Begleitverletzungen abgeschätzt werden. Außerdem ist es ratsam, den Patienten während des Entkleidens zu beobachten, um zu sehen, welche Bewegungen er durchführt bzw. welche er vermeidet. (62)

Die Palpation dient bei Verdacht auf eine Jefferson-Fraktur dazu, um einen paravertebralen Muskelhartspann zu identifizieren. Weitere Zeichen einer Fraktur sind Stauchungsschmerzen bei Ausübung eines leichten Schlages auf den Kopf und Schmerzen beim Fallenlassen aus dem Zehen- in den Fersenstand. (62)

1.2.10.3 Klinische Untersuchung

Hierbei sollen jene klinisch relevanten Punkte abgeklärt werden, die im *Kapitel 1.2.8; Klinisches Erscheinungsbild* angeführt wurden. Nach Begutachtet der Haltung und Stellung des Kopfes sowie dem Niveau der Schultern, prüft man nun das Bewegungsausmaß von Flexion, Extension, Lateralflexion und Rotation. Ebenso sind Schmerzen und Sensibilitätsausfälle als Zeichen einer neuronalen Schädigung, wie auch eine mögliche Kleinhirn- und Hirnstammsymptomatik im Falle einer Läsion der Arteria vertebralis, zu erheben. Dabei ist es ratsam, zu Beginn der Untersuchung den Patienten von sich aus die Beschwerden schildern zu lassen. Erst im Anschluss sollte die gezielte Befragung durch den Arzt erfolgen. (62) (34) (63)

Entsprechend der verzögerten Entwicklung eines retropharyngealen Ödems gilt auch bezüglich möglicher Atem- und Schluckbeschwerden eine Entstehungsdauer von 6 Stunden als Richtwert. (39)

Ein weiterer Aspekt ist jener, dass Jefferson-Frakturen praktisch nur im Zusammenhang mit Schädeltraumen entstehen. Ist das der Fall, so muss auch diesbezüglich eine weitere Abklärung erfolgen. (61)

Folgende Punkte sollten im Falle eines Schädeltraumas zusätzlich beachtet werden:

- 1) Bewusstseinszustand
- 2) äußere Schädelverletzungen
- 3) Blutungen oder evtl. Liquorrhö aus Nase oder Ohren und im Rachen
- 4) Hämatotympanon
- 5) Brillenhämatom, retroaurikuläres Hämatom
- 6) Allgemeinzustand und insbesondere Kreislaufverhältnisse (Schock!)
- 7) Neurostatus (speziell Pupillen, Sehfunktionen, Nystagmus, Gehör, Paresen, Pyramidenbahnzeichen)
- 8) beim Bewusstlosen Low-dose-Ganzkörperrentgen, CT der Halswirbelsäule und Schädel-CT zur sofortigen Erfassung einer Blutung

1.2.10.4 Bildgebende Verfahren

Erhärten die Voruntersuchungen den Verdacht einer Schädigung der oberen Halswirbelsäule, besteht die weiterführende Diagnostik in den bildgebenden Verfahren. Welche dabei zum Einsatz kommen, hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Im Normalfall wird als erstes ein *Röntgen in zwei Ebenen mit einer Denszielaufnahme* angefordert. Unter einem „Röntgen in zwei Ebenen“ versteht man eine Aufnahme mit einem anteroposterioren und einem lateralen Strahlengang. Die Denszielaufnahme bezieht sich auf den Dens axis. Dieser soll gemeinsam mit

dem Atlas zentral im Bild liegen und möglichst überlagerungsfrei sein. Deshalb wird sie auch mit Hilfe eines Zentralstrahls bei geöffnetem Mund aufgenommen. Jefferson-Frakturen sind in dieser speziellen Röntgenaufnahme besonders gut erkennbar. (5) (64) (41)

Anhand dieser drei Aufnahmetechniken ist es möglich, einen ersten aussagekräftigen Überblick zu erhalten. Abgesehen von eindeutigen Frakturzeichen und Dislokationen, die sofort ins Auge stechen, wie z.B. ein asymmetrischer interatlantodontoidaler Raum, gibt es weitere spezifische Kriterien, die eine Einschätzung der Stabilität der oberen Halswirbelsäule erlauben. (47) (65)

Am bekanntesten ist dabei wohl die „*Rule of Spence*“, die besagt, dass man von einer atlantoaxialen Instabilität ausgehen muss, wenn die *Massae laterales* den *Axis* seitlich um $> 6,9$ mm überlagern. Somit kann man also die Integrität des *Ligamentum transversum atlantis* beurteilen, das auf Röntgenbildern nicht abgebildet wird. (66)

Allerdings gibt es auch kritische Stimmen, die die Zuverlässigkeit dieser Regel anzweifeln. Laut *Dickman et al.* werden auf diese Weise über 60 % der Rupturen übersehen. (48)

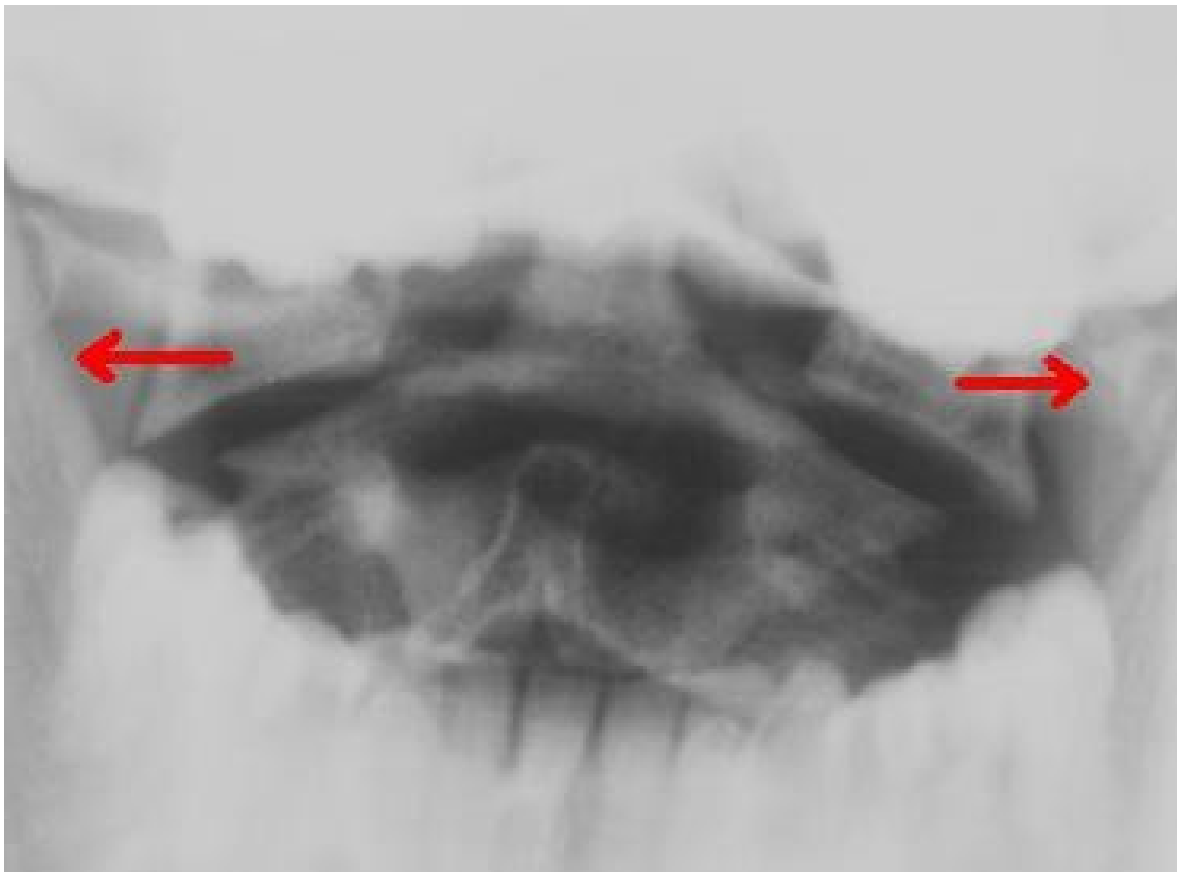


Abb. 10: Denszielaufnahme mit Auseinanderweichen der *Massae laterales*

<http://www.scientificspine.com/spinal-diseases/atlas-fracture.html>

Nur bedingt anwendbar ist die „*Rule of Spence*“ bei Kindern, da bei ihnen häufig ein sogenannter „Pseudospread“ vorliegt. Darunter versteht man die Tatsache, dass man bei Röntgenaufnahmen von kindlichen Halswirbelsäulen häufig - je nach Alter in bis zu 100 % der Fälle! - ein Überragen der *Massae laterales* über den *Axis* findet, ohne dass es als ein Zeichen für Instabilität zu werten ist. Vielmehr führt man diese Gegebenheit darauf zurück, dass das Wachstum des *Atlas* schneller voranschreitet als jenes des *Axis* und dadurch der seitliche Überhang entsteht. (67)

In der seitlichen Betrachtung kann eine Instabilität durch ein erhöhtes atlantodentales Intervall auffallen. Hierbei handelt es sich also um die Strecke zwischen Hinterseite des vorderen Atlasbogens und Vorderseite des *Dens axis*. Die Grenzwerte werden bei Erwachsenen mit 3 mm (65) (5) (49) und bei Kindern mit 5 mm (5) angegeben. (65) (5)

Um eine Stauchungsfraktur auszuschließen, kann man im lateralen Strahlengang zusätzlich noch zwei Linien einzeichnen: die *Chamberlain-Linie* und die *McGregor-Linie*. Die *Chamberlain-Linie* verläuft vom hinteren Oberrand des harten Gaumen bis zum Hinterrand des *Foramen magnum*, die *McGregor-Linie* vom hinteren Oberrand des harten Gaumen bis zur tiefsten Stelle des *Os occipitale*. Unter normalen Umständen, wenn also keine Stauchungsfraktur vorliegt, darf der *Dens axis* die *Chamberlain-Linie* nicht > 3 mm und die *McGregor-Linie* nicht > 4,5 mm überragen. (65)

Eine weitere Möglichkeit zur Diagnose einer atlantoaxialen Instabilität, ist die Anfertigung einer zervikalen Funktionsaufnahme in Flexion und Extension. Als Zeichen der Stabilität soll dabei der atlantodentale Abstand wiederum 3 mm (65) (5) (49) nicht überschreiten und bei beiden Aufnahmen in etwa gleich bleiben. Ebenso soll eine konstante Entfernung zwischen dem hinteren Atlasbogen und dem Okziput gegeben sein. Ein anderes Einsatzgebiet dieser Technik ist die Evaluierung von Therapien, da somit auch die Fusion der Knochenfragmente gut beurteilt werden kann. (38) (33) (28)

Die Frage nach der Stabilität ist deshalb so bedeutend, da die weitere Therapie maßgeblich davon abhängt. Aus diesem Grund ist es auch wichtig, dass in unklaren Fällen regelmäßige Verlaufskontrollen - ebenfalls mittels Flexions- und Extensionsaufnahmen - durchgeführt werden, um eine mögliche Instabilität frühzeitig zu erkennen. Insbesondere bei Patienten, die ein Polytrauma erlitten haben oder nicht bewusstseinsklar sind, sollten diesbezügliche Diagnoseschritte nicht vernachlässigt werden. (48) (5) (1) (39) (65)

Frakturlinien des Atlasrings sind am Röntgenbild sichtbar, jedoch hängt es von der Lokalisation ab, wie gut dies der Fall ist. Während Brüche des hinteren Atlasbogens leichter zu diagnostizieren sind, weist auf eine Fraktur des vorderen Bogens meist nur eine ausgeprägte retropharyngeale Schwellung hin. Der Richtwert für das Ödem, der diese Vermutung nahe legt, wird mit > 9,5 mm (39) angegeben. Erschwerend für die Diagnostik ist hierbei, dass die Schwellung nicht gleich, sondern erst nach etwa 6 Stunden (39) auftritt. Je nach Ausprägung kann sich diese dann klinisch mit Schluckstörungen und Atemnot manifestieren. (38) (39) (34)

Schwierig ist die Beurteilung von Synchronrosen bei Aufnahmen der kindlichen Halswirbelsäule. Ihr Erscheinungsbild ähnelt jenem von Frakturen, außerdem wurden auch schon verschiedene Variationen dieser knorpeligen Knochenverbindungen beschrieben. Je nach Lokalisation kann man also nur abschätzen, ob es sich eher um eine Synchronrose oder eher um eine Fraktur handelt, ohne dass es möglich ist, Gewissheit zu haben. Noch problematischer zu diagnostizieren sind Frakturen, welche direkt durch die Synchronrose verlaufen. Allerdings sei auch erwähnt, dass diese Knochenverbindungen gegenüber dem restlichen Atlasring keine erhöhte Bruchneigung haben. Im Falle einer Fehlinterpretation kann es schließlich zu einer sekundären

Verschiebung der Frakturteile kommen. Ungefähr um das 7. Lebensjahr (18) erübrigt sich diese Problematik mit der kompletten Verknöcherung aller drei Synchondrosen, wobei die hintere in der Regel schon um das 3. Lebensjahr (18) herum ossifiziert. In Ausnahmefällen kann die Verwachsung aber auch ganz ausbleiben und so die Synchondrose bis ins Erwachsenenalter weiterbestehen. (18) (17)

Wie auch immer sich nun die obere HWS darstellt, sollte man stets daran denken, auch die übrigen abgebildeten Strukturen zu befunden. Gerade bei offensichtlichen Frakturen im kraniozervikalen Übergang neigt man dazu, Begleitverletzungen der unteren Halswirbelsäule zu übersehen. (45) (65)

Die *Computertomographie* ist bezüglich der Bildgebung dem klassischen Röntgen klar überlegen, doch eben auch mit einer erhöhten Strahlenbelastung verbunden. Deshalb beschränkt man deren Einsatz und verwendet sie nicht als Routineverfahren.

Indikation für eine CT ist der Verdacht oder Nachweis einer Fraktur, die sich am Röntgenbild nicht eindeutig oder nur durch indirekte Frakturzeichen präsentiert. Damit will man sich einerseits einen besseren Überblick durch Darstellung der einzelnen Frakturlinien verschaffen - sofern diese vorhanden sind -, als auch gleichzeitig Begleitverletzungen ausschließen, die man in der Röntgenaufnahme unter Umständen nicht sieht. (5) (65)

Ein spezielles Verfahren ist hierbei die *Angio-CT*, die zum Ausschluss von Verletzungen der Arteria vertebralis dient. Diese treten insbesondere bei sehr lateralen Frakturen auf. Daran denken muss man v.a. bei Vorhandensein der bereits geschilderten, klinischen Auffälligkeiten (Kleinhirn- und Hirnstammsymptomatik, Seh- und Hörstörungen, Schwindel etc.) und bei hohem Blutverlust. Auch Gefäßverschlüsse können mit dieser Untersuchungsmethode diagnostiziert werden. (5) (55) (24) (6) (28)

Nennenswerte Vorteile des CT sind außerdem die leichtere Identifizierung eines „Pseudospreads“, wie auch die Möglichkeit der genauen Beurteilung von unüblichen Frakturtypen. Ein Beispiel dafür wären wiederum die von *Bransford et al.* beschriebenen sechs Fälle einer unilateralen, sagittalen Splitterfraktur der Massa lateralis. Außerdem sind in der Computertomographie knöcherne Ausrisse des Ligamentum transversum atlantis direkt nachweisbar. (38) (28) (5)

Man muss aber auch sagen, dass selbst dem CT einige wenige Grenzen gesetzt sind. Hier kann man wiederum die Problematik mit den Synchondrosen als Beispiel anführen. Die aus Knorpelgewebe bestehenden Knochenverbindungen können bei dieser Untersuchungsart ebenfalls nicht immer einwandfrei von Frakturlinien unterschieden werden. (18)

Die *Magnetresonanztomographie* ist eine relativ kosten- und zeitaufwändige Untersuchung, liefert aber dafür eine dementsprechend hohe diagnostische Qualität. Je nach Fragestellung kann man zwischen zwei unterschiedlichen Gewichtungen und verschiedenen Sequenzen wählen. Während in der *T1-Gewichtung* Fett hyperintens erscheint, stellt sich in der *T2-Gewichtung* Wasser - und damit auch der Liquor cerebrospinalis - heller dar. Eine gängige Sequenz bei Jefferson-Frakturen ist z.B. die *STIR-Sequenz*, mit der eine sensitive Fraktur- und Ödemdetektion möglich ist. (68) (65)

Ein weiterer Vorteil des MRT ist, dass Bandstrukturen ebenfalls abgebildet werden. Somit kann auch eine Ruptur des Ligamentum transversum atlantis im Spinalkanal - also ohne knöchernen Ausriss - direkt nachgewiesen werden. (18) (5)

1.2.11 Therapie

Die Wahl der Therapie richtet sich nach der Stabilität. Während stabile Jefferson-Frakturen fast ausschließlich mit konservativen Therapiemaßnahmen auskuriert werden, gibt es bei instabilen Brüchen keine einheitliche Meinung darüber, was die beste Behandlungsform ist. (3) (41)

In der Regel besteht diese in einer Operation, jedoch wurden in der Vergangenheit auch schon Fälle beschrieben, in denen instabile Berstungsfrakturen durch konservative Therapien erfolgreich behandelt wurden. Dabei muss es sich bei der Läsion des Ligamentum transversum atlantis um einen knöchernen Ausriss, also einer Typ II-Verletzung, handeln, dessen Knochenfragment bei ausreichender Immobilisation spontan wieder mit dem Atlaswirbel verheilen kann. Kommt es allerdings zu einer Typ I-Verletzung, ist nur ein operativer Eingriff zielführend, da ein rupturiertes Ligamentum auch bei Ruhigstellung nicht wieder verwächst. (5) (39) (33) (48) (38)

Weitere therapieentscheidende Punkte sind der Frakturtyp und die Begleitverletzungen der Wirbelsäule. Zum Beispiel kann man neben einer Densfraktur auch intraartikuläre Frakturen als Operationsindikation ansehen, da sie bei konservativer Behandlung ein deutlich ungünstigeres Outcome aufweisen. Auch bei hochgradig dislozierten Frakturfragmenten kommen in der Regel chirurgischen Maßnahmen zum Einsatz. (38) (28) (47) (5)

Vaskuläre und neurologische Kriterien spielen bei der Wahl der Therapie ebenso eine Rolle. So ist es Voraussetzung für bestimmte Operationstechniken, bei denen ein erhöhtes Risiko für die Arteriae vertebrales gegeben ist, dass beide Gefäße durchgängig sind. Im Falle eines einseitigen Verschlusses sollten solche Eingriffe durch andere chirurgische Methoden ersetzt werden, da ansonsten bei einer Verletzung der intakten Arterie die Gefahr einer Unterversorgung des Gehirns besteht. (5) (28)

Vom neurologischen Standpunkt aus muss überlegt werden, inwiefern ein Eingriff bei einer vorstattengegangenen Schädigung des neuronalen Gewebes noch Sinn macht, da dessen Regenerationsfähigkeit sehr begrenzt ist. Das totale Schadensausmaß kann allerdings aufgrund der Komplexität dieser Region erst Wochen nach dem Trauma vollständig erhoben werden. (44)

Unabhängig von der gewählten Therapieform ist das Behandlungsziel die Restitution der anatomischen Verhältnisse. Darunter versteht man sowohl das Wiedererlangen der Höhe zwischen dem Okziput und dem Axis, damit die Bänder gespannt sind und ihre Funktion wiedererlangen, als auch die Annäherung der Knochenfragmente um eine schnelle und komplikationsarme Heilung zu ermöglichen. (33) (37) (3) (42)

Folgende gängige Therapiemethoden kommen bei Jefferson-Frakturen zum Einsatz:

- Anlage eines Halo-Fixateurs
- direkte dorsale C1-Osteosynthese
- dorsale C1/C2-Fusion
- dorsale C0/C3-Fusion
- dorsale C1/C2-Verschraubung nach Magerl
- transorale C1-Osteosynthese
- ventrale C1/C2-Fusion

1.2.11.1 Konservative Therapie

Während es bei stabilen Jefferson-Frakturen gängige Praxis ist, diese mit konservativen Maßnahmen zu therapieren, wird ihr Einsatz bei instabilen Berstungsbrüchen kritischer gesehen. Es wurden zwar schon einzelne Fälle dokumentiert, in denen man die vorhandene Instabilität derart reduzieren konnte, dass eine Knochenheilung ermöglicht wurde, das Risiko der Entstehung irreversibler Inkongruenzen ist aber nach heutiger Ansicht nicht tolerabel. Diese bedingen in weiterer Folge Bewegungseinschränkungen und persistierende Nackenschmerzen. Um diese Gefahr zu vermeiden, befürwortet man bei instabilen Verletzungen ein operatives Vorgehen. (3) (41) (39) (5) (2) (4) (33)

Bei Anwendung von konservativen Maßnahmen hat sich einerseits der Halo-Fixateur und andererseits die harte Schanzkrawatte bewährt. Beim Halo-Fixateur werden 4 Knochenschrauben („Pins“) im Schädel angebracht und diese mit einem Ring („Halo“) verbunden. Dieser wird von 2 Stützen getragen, die wiederum an einem Kunststoffkorsett befestigt sind. Sinn dieser Apparatur ist es, dass die Halswirbelsäule entlastet wird, indem das Gewicht des Kopfes über dieses Gestänge direkt auf den Oberkörper übertragen wird. (44)



Abb. 11: Halo-Fixateur

<http://www.rehadat.de/rehadat/Reha.KHS?Db=0&State=340&SORT=T05&GLX=OW/01178>

Obwohl Halo-Fixateure unter den nichtoperativen Therapiemöglichkeiten das beste Ergebnis liefern, sind sie ebenfalls mit wesentlichen Nachteilen vergesellschaftet. So handelt es sich dabei um eine relativ unkomfortable und mit einer Dauer von 6 - 12 Wochen (3) (4) auch ziemlich langwierige Therapievariante. Zusätzlich gibt es keine Garantie für einen Behandlungserfolg. Insbesondere Verletzungen, die nicht eindeutig als stabil klassifiziert werden konnten, neigen vermehrt zu Inkongruenzen und progressiven Dislokationen. (4) (3) (2) (5) (38)

Außerdem kann es an den Eintrittsstellen der Schrauben zu Infektionen kommen, die sogar die Entfernung des Halo-Fixateurs erfordern können. Infolgedessen besteht die Möglichkeit, eine Behandlung mit einem harten Collar (z.B. Philadelphia-Krawatte, Miami J Collar etc.) durchzuführen. Um mögliche Verschlechterungen frühzeitig zu erkennen, ist es ratsam, bei einem Einsatz von derartigen Cervikalorthesen regelmäßige klinische und radiologische Kontrollen durchzuführen. (4) (28) (33)

Bei Ansprechen der konservativen Behandlung liegt der klare Vorteil in der Vermeidung eines operativen Eingriffs. Neben diesem Aspekt ist besonders bei jüngeren Patienten die Erhaltung eines akzeptablen Bewegungsausmaßes ein zusätzlicher therapieentscheidender Faktor. (5)

1.2.11.2 Operative Therapie

Bei instabilen Jefferson-Frakturen kommen chirurgische Interventionen zum Einsatz. Hierzu wurden schon mehrere Operationsvarianten beschrieben. (38) (40) (47) (37) (4) (3)

Der wesentliche Unterschied liegt in der Wahl des Zugangs. Während beim hinteren die Annäherung der Knochenbruchstücke erschwert ist, stößt bei manchen Autoren der vordere transorale Zugang aufgrund des gesteigerten Infektionsrisikos (9-22 %) (69) (7) auf Ablehnung. (28) (3) (37)

1.2.11.2.1 Hinterer Operationszugang

1.2.11.2.1.1 Direkte dorsale Osteosynthese des Atlas

Bei dieser Technik wird zunächst in jede Massa lateralis eine Schraube eingebracht, wobei die zwei Eintrittspunkte zentral gewählt werden. Diese interagieren durch ein horizontales Verbindungsstück, welches außen dem frakturierten hinteren Atlasbogen anliegt. Die Operation wird unter Zugwirkung am Kopf durchgeführt, um eine Annäherung der Knochenfragmente zu erreichen. Aus dem gleichen Grund wird auch auf die Schrauben, bevor sie verbunden werden, eine transversale Kraft ausgeübt. Durch die Rekonstruktion des Atlasrings erlangt man außerdem die ursprüngliche Höhe der Halswirbelsäule zurück, sodass man auch die Stabilität durch den Bandapparat wiedergewinnt. (40) (37)

Das Outcome wird als hervorragend beschrieben. Es ist sofortige Stabilität zu verzeichnen und auch der weitere Verlauf ist in der Regel komplikationsarm. Bewegungsausmaß und Ausrichtung des Kopfes sind postoperativ wieder normal und nach 7-12 Monaten (40) (37) kommt es zur vollständigen Frakturheilung bei kompletter Schmerzfreiheit. (40) (37)

In einer Kadaverstudie mit 6 Exemplaren wurden diesbezüglich monoaxiale mit polyaxialen Schrauben verglichen. Das Ergebnis zeigte, dass mit den monoaxialen Schrauben eine etwas bessere Annäherung der Knochenfragmente und damit eine leicht erhöhte Stabilität zu erreichen ist, während der Vorteil der polyaxialen Schrauben in einem einfacheren Handling bei der Operation und einer gesteigerten postoperativen Bewegungsfreiheit liegt. (52)

1.2.11.2.1.2 Dorsale C1/C2-Fusion

Bei dieser Methode werden erneut zwei Schrauben zentral in die Massae laterales eingebracht. Anschließend wird in beide Pedikel des Axis eine weitere Schraube eingesetzt. Der Eintrittspunkt dieser Schrauben ist weiter lateral, wodurch sich ein steilerer Verlauf nach medial ergibt. Anschließend erfolgt eine

senkrechte Verbindung beider Schrauben auf jeder Seite. Auf die dazu verwendete Metallstange werden in weiterer Folge wiederum transversale Kräfte ausgeübt, um eine Reduktion der Frakturspalten zu erreichen. Zuletzt werden diese senkrechten Verbindungsstangen horizontal mit einer weiteren Metallstange verbunden. (47) (12)

Basierend auf dieser Technik beschrieben *Tessitore et al.* eine eigene Variante bei der sie statt Pedikel-Schrauben Isthmus-Schrauben verwendeten. Diese haben gegenüber den Pedikel-Schrauben einen medialeren Eintrittspunkt, der annähernd in einer senkrechten Linie mit den Eintrittspunkten der Massa-lateralis-Schrauben liegt. Der Grundgedanke dahinter war jener, dass damit ein größerer Abstand zur Arteria vertebralis eingehalten und so das Verletzungsrisiko für dieses Gefäß gesenkt werden kann. (4)

Bei beiden Operationsarten war das Ergebnis zufriedenstellend. Auch hier erreichte man sofortige Stabilität und eine Verheilung der Frakturstellen nach spätestens 12 Monaten (4). Der große Nachteil, den man bei dieser Operation in Kauf nehmen muss, ist die durch die Fusion bedingte Einschränkung der Kopffrotation. (47) (4)

1.2.11.2.1.3 Dorsale C0/C3-Fusion

Ist es aufgrund des Frakturtyps nicht möglich, Massa-lateralis-Schrauben einzusetzen, muss auf eine andere Operationsart zurückgegriffen werden. Eine Möglichkeit liegt in der Verplattung des Okziputs bis zum dritten Halswirbel. Zur Befestigung an den Wirbeln können dabei translaminäre, transartikuläre und Pedikel-Schrauben verwendet werden. Bei den letzten beiden Schraubentypen muss besonders auf die Vermeidung von Verletzungen der Arteria vertebralis geachtet werden. Mit dieser Methode wurden beispielsweise alle drei von *Bransford et al.* beschriebenen Patienten mit unilateralen, sagittalen Splitterbrüchen der Massae laterales versorgt, nachdem die konservative Therapie versagt hatte. (28)

Bei erfolgreichem Eingriff resultiert auch aus dieser Operation Stabilität, Schmerzfreiheit und eine normale Ausrichtung des Kopfes. Der immense Nachteil ist hierbei jedoch der totale Bewegungsverlust in den Kopfgelenken. Deshalb wird diese Technik nur mehr selten angewandt, insbesondere für jüngere Patienten würde dieses Outcome eine signifikante Einschränkung der Lebensqualität bedeuten. Im höheren Alter haben moderne Plattensysteme hingegen den Vorteil, dass sie mit speziellen Spreizschrauben eingesetzt werden können, die eine bessere Verankerung im osteoporotischen Knochen ermöglichen. (28) (25) (5)

1.2.11.2.1.4 Dorsale C1/C2-Verschraubung nach Magerl

Bei dieser Technik werden zwei Schrauben durch die Articulationes atlantoaxiales laterales gelegt. Das sind jene zwei Gelenke, die von den unteren Gelenkflächen des Atlas und den oberen Gelenkflächen des Axis gebildet werden. Verglichen mit den zwei zuvor erwähnten Methoden der dorsalen C1/C2-Fusion

bedeutet dieser Eingriff einen technisch höheren Aufwand. Der Eintrittspunkt der transartikulären Schrauben liegt dabei direkt über dem Processus transversus des Axis. Der Einbringwinkel wird so gewählt, dass das Ende der Schrauben im Bereich des mittleren bis kranialen Atlasdrittel zu liegen kommt. Da bei dieser Operationsvariante jedoch keine intraoperative Reduktion der Frakturspalten erreicht werden kann, muss diese mittels konservativer Therapiemaßnahmen präoperativ erfolgen. (70) (25)

Die Erfolgsraten für die Knochenfusion liegen bei 90-100 % (71), was für eine hohe postoperative Stabilität spricht. Diese Methode hat aber wiederum den Nachteil eines erheblichen Verlusts der Bewegungsfreiheit, da durch die Versteifung des unteren Kopfgelenks Rotationsbewegungen nicht mehr durchführbar sind. Dagegen bleiben Ventral- und Dorsalflexion uneingeschränkt möglich. (47)

1.2.11.2.2 Vorderer Operationszugang

Bei diesem Zugang erfolgen die Eingriffe an der oberen Halswirbelsäule über die Mundhöhle. Von einigen Autoren wird diese Technik mit dem Argument eines erhöhten Infektionsrisikos abgelehnt. Tatsächlich wurden Wundinfektionen in bis zu 22 % (69) (7) der Fälle beschrieben. (3) (69) (7)

Nichtsdestotrotz operierten *Ruf et al.* erfolgreich sechs Patienten über einen transoralen Zugang, ohne dass es zu einer einzigen Infektion kam. Sie wandten dabei verschiedene Methoden an, die im Wesentlichen mit jenen des hinteren Zugangs ident sind. So wurden auch hier als erster Schritt Massa-lateralis-Schrauben eingebracht und durch Ausübung transversaler Kräfte eine Annäherung der Frakturfragmente bewirkt. Anschließend wurde je nach gewählter Methode eine Osteosynthese des vorderen Atlasbogens oder eine Fusion mit dem Axis durchgeführt, wofür ebenfalls Pedikel-Schrauben zum Einsatz kamen. Ebenso stehen auch für diesen Zugang verschiedene Plattensysteme zur Verfügung. (3)

Auch hier erreichte man befriedigende Ergebnisse. So konnte bei allen Patienten sofortige Stabilität verzeichnet werden. Gleichzeitig erlangte man einen durchschnittlichen Rotationsumfang von 39,2°, wovon besonders jüngere Patienten profitieren. (3)

1.2.11.2.3 Gefährdete Strukturen

Bei dem Einbringen der Massa-lateralis-Schrauben bzw. der Pedikel-Schrauben ist eine genaue Kontrolle mit dem Bildwandler nötig, da es bei geringen Abweichungen schon zu gravierenden Komplikationen kommen kann. Konkret geht es dabei um eine mögliche Verletzung der Arteria vertebralis, wenn man aufgrund der Bohrrichtung bzw. eines falsch gewählten Eintrittspunkts zu weit nach lateral gelangt, oder es kommt zu einer Läsion der Dura mater bzw. des Rückenmarks, wenn man zu weit nach medial gerät. (5)

Bei Massa-lateralis-Schrauben besteht aufgrund des Arterienverlaufs auch noch die Gefahr einer Blutung, wenn man sich für einen zu steilen Winkel nach kranial entscheidet. Dann kann die Arteria vertebralis im

Bereich der Pars atlantica - also in jenem Abschnitt, der im Sulcus arteriae vertebralis verläuft - ebenfalls von der Schraubenspitze getroffen werden. (5)

2 Material und Methoden

Als Grundlage dieser Diplomarbeit dienten 50 CT-Datensätze. Diese stammen von Patienten, die als Polytrauma in das LKH-Univ. Klinikum Graz eingeliefert wurden. Angefertigt wurden sie mit einem 64-zeiligen Computertomographen der Firma *Siemens SOMATOM Sensation® CT System* (Siemens Medical Solutions USA Inc., 51 Valley Stream Parkway, Malvern, PA 19355, United States).

Das Patientenspektrum umfasste dabei 38 Männer (76 %) und 12 Frauen (24 %). Das Alter rangierte von 17 - 86 Jahren (Männer: 17 - 82 Jahre; Frauen: 18 - 86 Jahre), wobei der Durchschnitt bei 44 Jahren (Männer: 43,7 Jahre; Frauen: 45 Jahre) lag.

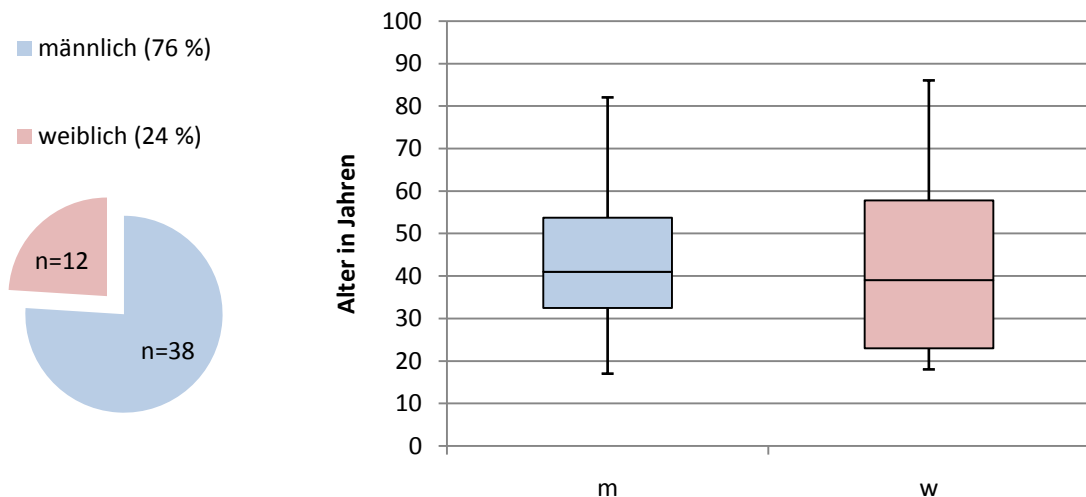


Abb. 12: Geschlechts- und Altersverteilung des Patientenkollektivs

Mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms *Mimics®* (Materialise HQ, Technologielaan 15, 3000 Leuven, Belgium) wurden zunächst Schrauben virtuell bezüglich Länge und Lage so in diese CT-Aufnahmen hineinprojiziert, wie sie im Falle einer operativen Versorgung einer Jefferson-Fraktur auch wünschenswert gewesen wären. Anschließend wurden diverse Punkte definiert, die eine präzise Vermessung dieser Region ermöglichten. Die Benutzeroberfläche gliedert sich in eine horizontale, eine frontale und eine sagittale Schnittebene, sowie einem 3D-Modell. Diese ausgesprochen gute Übersicht erleichterte maßgeblich die Bestimmung der Bezugspunkte.

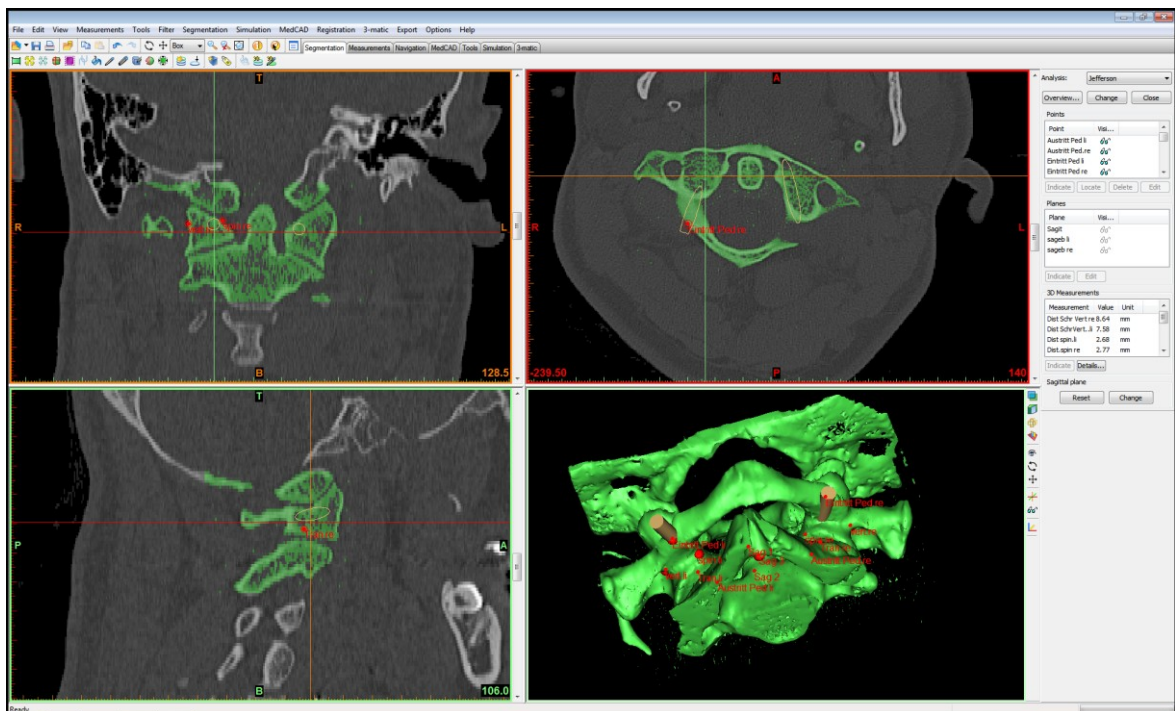


Abb. 13: Mimics - Benutzeroberfläche

Die Messergebnisse wurden anschließend in das Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft Excel 2007* (Microsoft Corporation, Redmond, USA) übertragen. Daraus wurden dann der Mittelwert, die Standardabweichung, die relative Standardabweichung und der Median ermittelt.

2.1 Bezugspunkte und Erhebung der Daten

Schraubenlänge

Die Schraubenlänge wurde erhoben, indem man den Ein- und Austrittspunkt der Schrauben markierte und eine Verbindungslinie zwischen diesen beiden Punkten setzte. Die Länge der so entstandenen Linie entspricht jener der Schraube.

Distanz der Schraube zur Arteria vertebralis und dem Spinalkanal

Um den geringsten Abstand zwischen der Schraube und diesen zwei, in unmittelbarer Nähe liegenden Strukturen zu bestimmen, wurden im Foramen transversum und im Canalis vertebralis jene Punkte markiert, die der Schraube am nächsten lagen. Anschließend wurde der Abstand dieser zwei Bezugspunkte zur Schraube berechnet.

Transversalwinkel

Für die Ermittlung dieses Winkels wurden drei Ebenen kreiert. Die erste entspricht der Medianebene bzw. der Körpersymmetrieachse, sie verläuft also genau mittig durch den vorderen Atlasbogen, den Dens axis und den hinteren Atlasbogen. Jeweils eine Ebene wurde dann noch vertikal durch die Schrauben gelegt. Diese dienen quasi als Verlängerung der beiden Schrauben und schneiden ventral des vorderen Atlasbogens die erste Ebene. Der Winkel, der dadurch beidseitig eingeschlossen wird, ist der gesuchte Transversalwinkel.

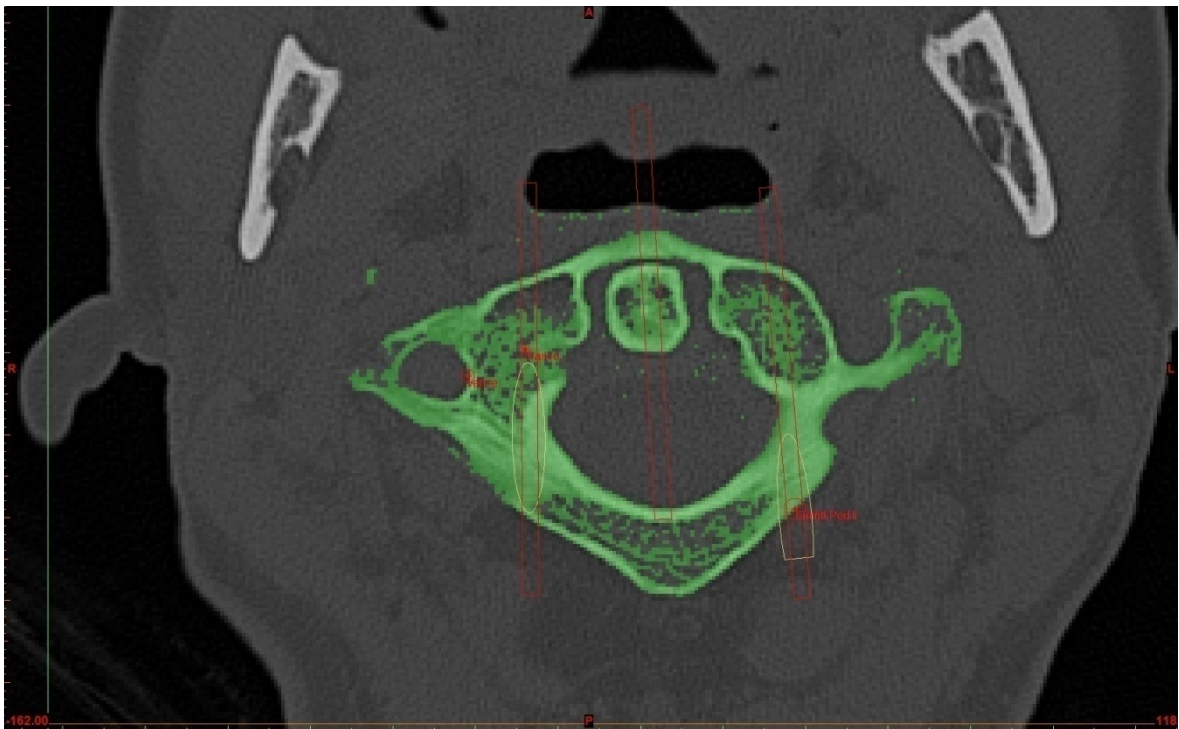


Abb. 14: Ermittlung des Transversalwinkels im Horizontalschnitt

Sagittalwinkel

Neben dem Transversalwinkel bedarf es zusätzlich noch des Sagittalwinkels, um die genaue Einbringrichtung der Schraube angeben zu können. Um jenen zu erheben, wurde im Sagittalschnitt eine Linie so erstellt, dass sie der Bodenkante des Axis entspricht. Verlängert man nun sowohl diese neu gebildete Linie, als auch die Verbindungslinie des Ein- und Austrittspunkts der jeweiligen Schraube, erhält man ihren Schnittpunkt. Bei dem so entstandenen Winkel handelt es sich um den Sagittalwinkel. Da dieser in unserem Modell segmentüberschreitend (C1, C2) berechnet wird, gelten die Ergebnisse freilich nur für einen in Neutralposition gelagerten Patienten (wie bei unserem Kollektiv).

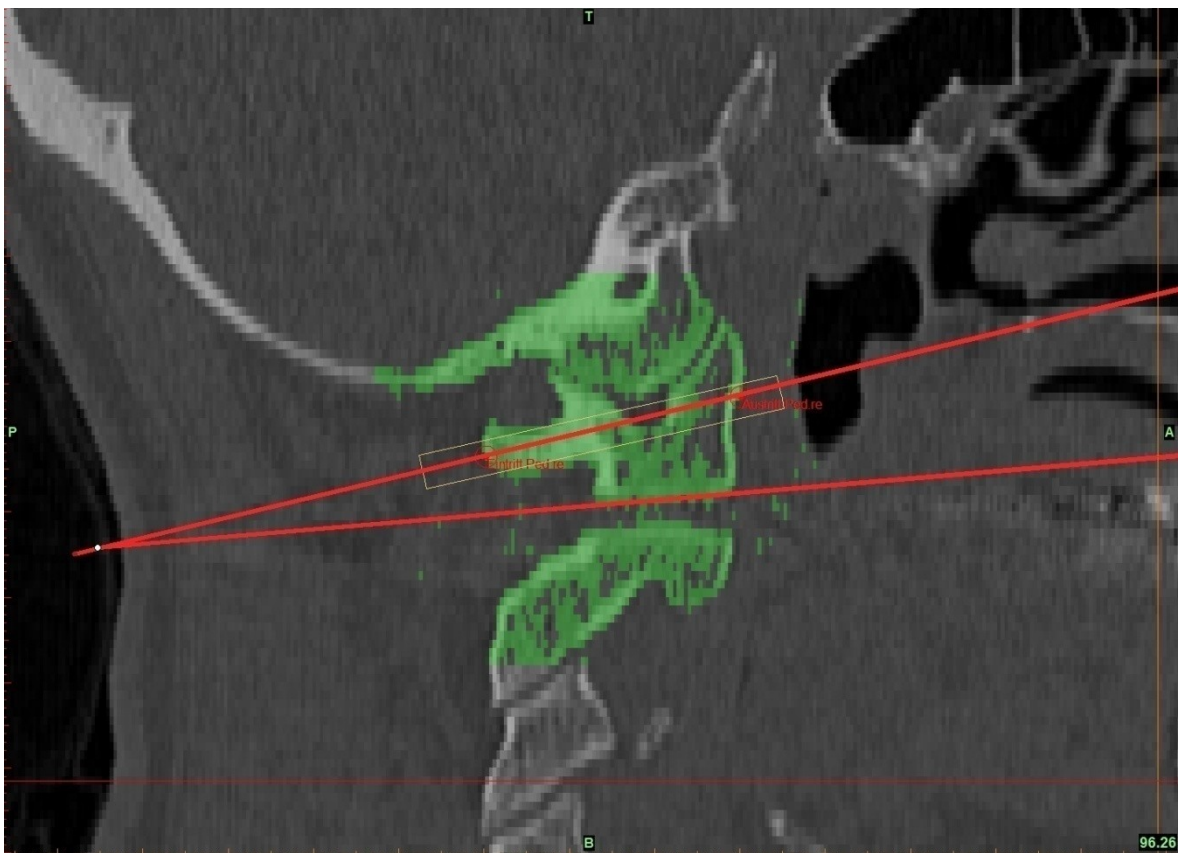


Abb. 15: Ermittlung des Sagittalwinkels im Sagittalschnitt

3 Ergebnisse

Schraubenlänge

Die mittlere Schraubenlänge, also der Abstand zwischen Ein- und Austrittspunkt der Schraube, beträgt auf der rechten Seite 29,96 mm (Standardabweichung: $\pm 2,31$ mm; relative Standardabweichung: 7,73 %) und auf linken Seite 30,08 mm (Standardabweichung: $\pm 2,07$ mm; relative Standardabweichung: 6,88 %). Der Median liegt rechts bei 30,07 mm und links bei 30,54 mm, wobei die Werte von 25,69 - 34,33 mm bzw. von 26,01 - 34,02 mm rangieren. Eine signifikante Korrelation der Schraubenlänge konnte weder geschlechtsspezifisch (p-Wert, rechts: 0,1769; p-Wert, links: 0,1121) noch seitenspezifisch (p-Wert, Männer: 0,3149; p-Wert, Frauen: 0,3734) festgestellt werden.

gesamt	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
SchrLänge, re	29,96	2,31	7,73	30,07	25,69	34,33
SchrLänge, li	30,08	2,07	6,88	30,54	26,01	34,02

männlich	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
SchrLänge, re	30,27	2,21	7,31	30,28	25,69	34,33
SchrLänge, li	30,11	2,05	6,80	30,55	26,01	34,02

weiblich	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
SchrLänge, re	28,98	2,45	8,45	28,95	25,80	32,57
SchrLänge, li	29,98	2,23	7,42	29,96	27,08	33,92

Tab. 7: Messergebnisse – Schraubenlänge

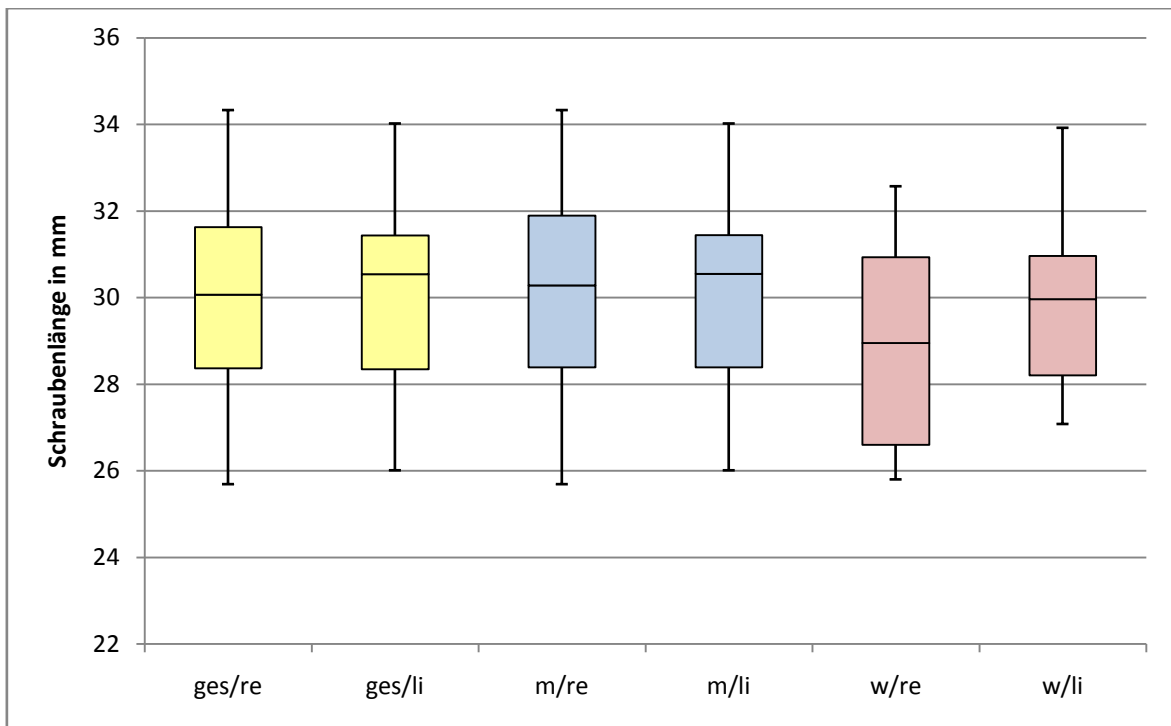


Abb. 16: Boxplot – Schraubenlänge

Distanz der Schraube zur Arteria vertebralis und dem Spinalkanal

Der Mittelwert für die geringste Distanz zwischen Schraube und *Arteria vertebralis* beträgt rechts 7,10 mm (Standardabweichung: $\pm 1,50$ mm; relative Standardabweichung: 21,16 %) und links 7,44 mm (Standardabweichung: $\pm 1,38$ mm; relative Standardabweichung: 18,50 %). Die Mediane liegen bei 7,28 mm rechts bzw. 7,62 mm links. Eine relativ hohe Spanne findet man bei den Minimal- und Maximalwerten. Diese reichen rechts von 3,55 - 9,53 mm und links von 3,60 - 10,26 mm. Der bei der Operation anzustrebende Wert liegt dabei im mittleren Intervall, da ein größerer Abstand zur Arteria vertebralis eine geringere Distanz zum Spinalkanal bedeutet. Aufgrund der teils größeren Wirbelkörper der männlichen Patienten überwiegen bei ihnen weitere Abstände, ohne dass sich daraus eine gleichzeitige Annäherung der Schraube an den Spinalkanal ergibt. Der Spielraum bei der Einbringung der Schraube ist bei Männern also naturgemäß etwas größer. In der geschlechtsspezifischen Auswertung spiegelt sich diese Tatsache zwar durch eine signifikante Korrelation zwischen Geschlecht und Distanz der Massa-lateralis-Schraube zur Arteria vertebralis auf der rechten Seite wider (p-Wert, rechts: 0,0324), da dies aber linksseitig nicht der Fall ist (p-Wert, links: 0,1012), muss diese Aussage kritisch betrachtet werden, da es sich bei diesem Resultat auch um ein Zufallsergebnis handeln könnte. Seitenspezifisch liegt wiederum keine signifikante Korrelation vor (Männer: p-Wert: 0,1455; Frauen: p-Wert: 0,2555).

Der Abstand zwischen Schraube und *Spinalkanal* liegt auf der rechten Seite im Mittel bei 2,37 mm (Standardabweichung: $\pm 0,72$ mm; relative Standardabweichung: 30,51 %) und auf der linken Seite bei 2,16 mm (Standardabweichung: $\pm 0,59$ mm; relative Standardabweichung: 27,41 %). Der Median beträgt 2,24 mm rechts und 2,05 mm links. Entsprechend den Ergebnissen bezüglich des Abstandes zur Arteria

vertebralis gibt es auch hier Schwankungen von 1,15 - 5,51 mm auf rechten und 1,12 - 4,44 mm auf der linken Seite. Ebenso konnte keine signifikante Korrelation zwischen Distanz der Massa-lateralis-Schraube zum Spinalkanal und Geschlecht (rechts: p-Wert: 0,1349; links: p-Wert: 0,1893) oder Seite (Männer: p-Wert: 0,0878, Frauen: p-Wert: 0,2849) gezeigt werden.

gesamt	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
Dist. SchrVert, re	7,10	1,50	21,16	7,28	3,55	9,53
Dist. SchrVert, li	7,44	1,38	18,50	7,62	3,60	10,26
Dist. SchrSpin, re	2,37	0,72	30,51	2,24	1,15	5,51
Dist. SchrSpin, li	2,16	0,59	27,41	2,05	1,12	4,44

männlich	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
Dist. SchrVert, re	7,32	1,43	19,55	7,41	4,29	9,53
Dist. SchrVert, li	7,64	1,13	14,74	7,67	5,21	9,77
Dist. SchrSpin, re	2,42	0,80	33,25	2,28	1,15	5,51
Dist. SchrSpin, li	2,17	0,65	30,16	2,00	1,12	4,44

weiblich	Mittelwert [mm]	σ [mm]	rel. σ [%]	Median [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]
Dist. SchrVert, re	6,44	1,60	24,79	6,67	3,55	8,62
Dist. SchrVert, li	6,79	1,89	27,81	6,83	3,60	10,26
Dist. SchrSpin, re	2,22	0,35	15,87	2,18	1,57	2,73
Dist. SchrSpin, li	2,16	0,36	16,82	2,17	1,49	2,87

Tab. 8: Messergebnisse – Distanz Schraube - A. vertebralis / Distanz Schraube - Spinalkanal

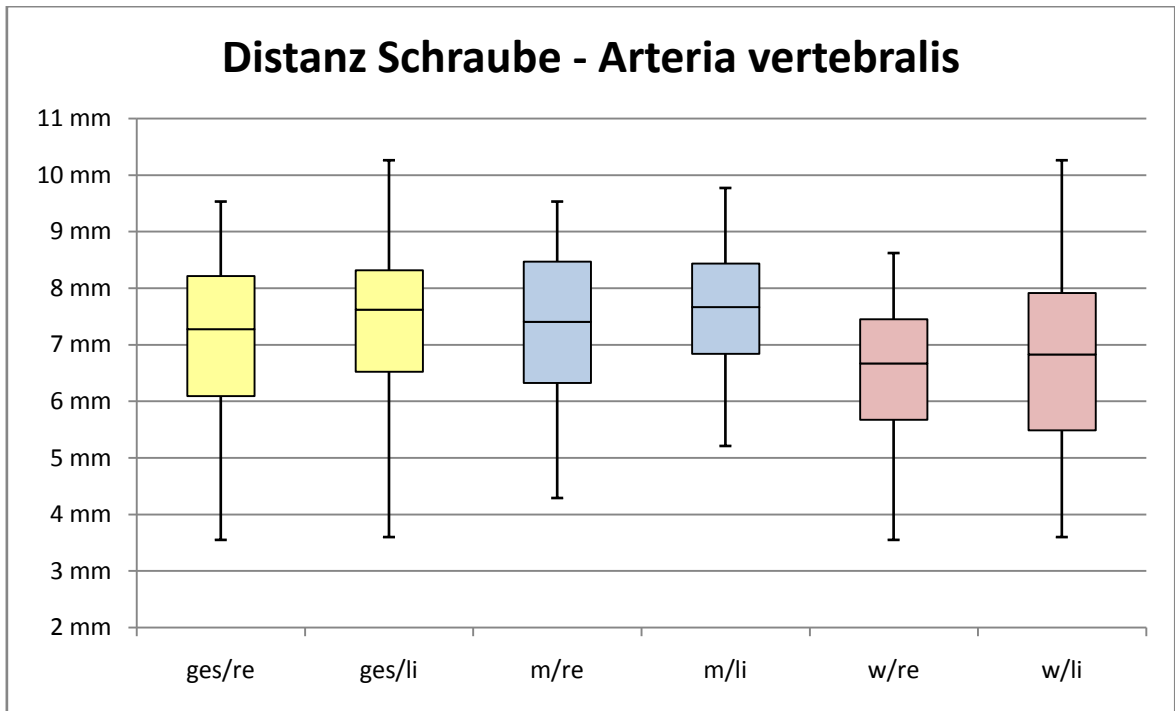


Abb. 17: Boxplot - Distanz Schraube - A. vertebralis

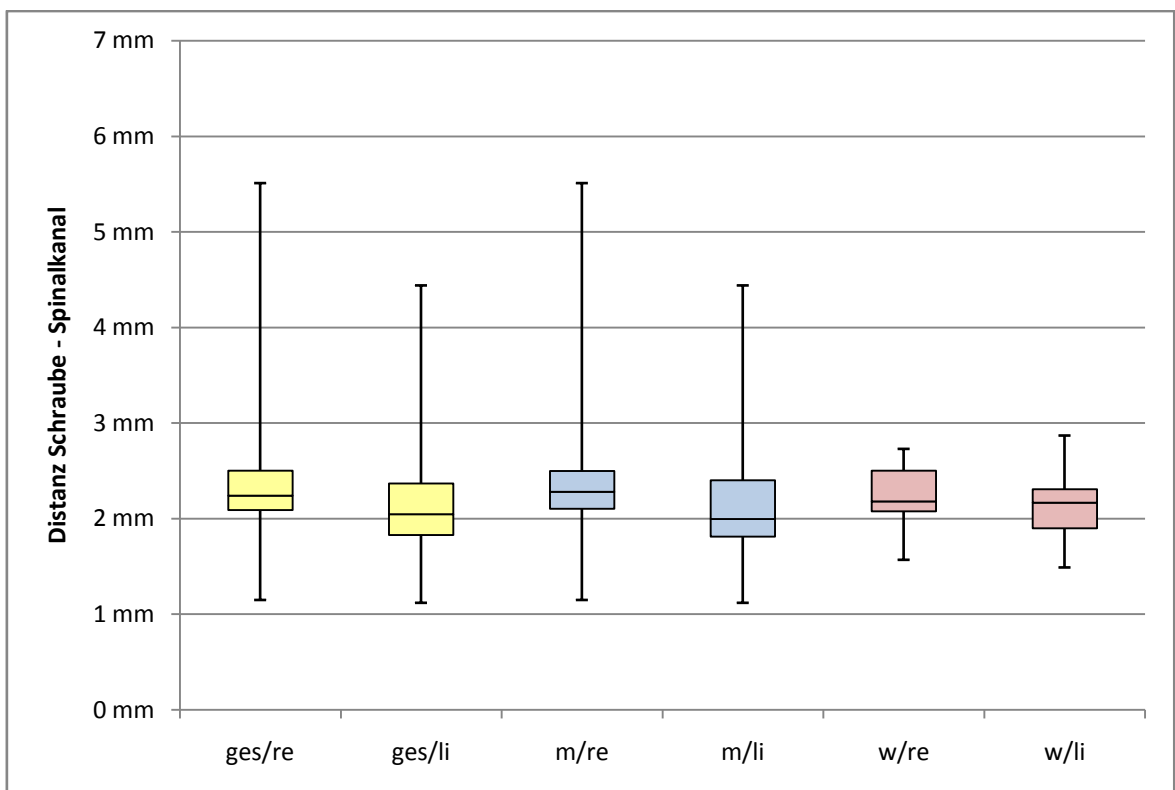


Abb. 18: Boxplot - Distanz Schraube - Spinalkanal

Transversalwinkel

Im Mittel beträgt der horizontale Einbringwinkel rechts 16,38° (Standardabweichung: ± 5,58°; relative Standardabweichung: 34,07 %) und links 15,62° (Standardabweichung: ± 6,27°; relative Standardabweichung: 40,13 %) zur Körpersymmetrieachse. Ähnlich verhält es sich bei den Medianen. Rechts liegt dieser bei 15,26° und links bei 14,85°. Das Spektrum umfasst auf der rechten Seite Werte von 7,05 - 33,48° und auf der linken 5,49 - 34,35°. Geschlechts- und seitenspezifisch betrachtet, findet sich keine signifikante Korrelation mit dem Transversalwinkel (rechts: p-Wert: 0,9203; links: p-Wert: 0,6473; Männer: p-Wert: 0,3022; Frauen: p-Wert: 0,4327).

gesamt	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel transv, re	16,38	5,58	34,07	15,26	7,05	33,48
Winkel transv, li	15,62	6,27	40,13	14,85	5,49	34,35

männlich	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel transv, re	16,00	4,93	30,80	15,35	7,05	28,76
Winkel transv, li	15,04	5,83	38,74	14,29	7,00	34,35

weiblich	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel transv, re	17,59	7,42	42,16	14,05	10,62	33,48
Winkel transv, li	17,45	7,48	42,86	16,77	5,49	31,80

Tab. 9: Messergebnisse – Transversalwinkel

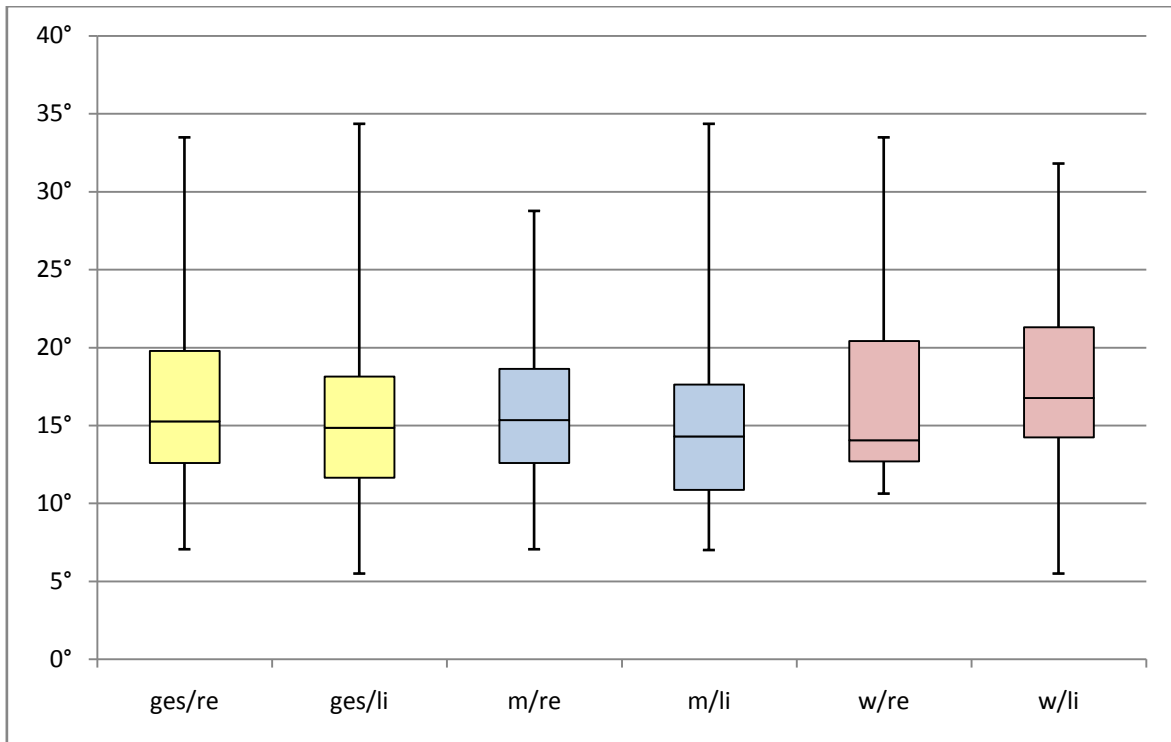


Abb. 19: Boxplot – Transversalwinkel

Sagittalwinkel

Der Mittelwert liegt bei diesem Winkel auf der rechten Seite bei $8,25^\circ$ (Standardabweichung: $\pm 3,79^\circ$; relative Standardabweichung: 45,99 %) und auf der linken Seite bei $11,00^\circ$ (Standardabweichung: $\pm 4,89^\circ$; relative Standardabweichung: 44,48 %) zur Wirbelkörperbodenplatte von C2 in Neutralposition. Die beiden Mediane weichen im Vergleich mit jenen des Horizontalwinkels stärker voneinander ab. Rechts beträgt dieser $8,39^\circ$, während links ein Wert von $11,23^\circ$ erhoben wurde. Dabei variiert der Anstiegswinkel rechtsseitig zwischen $0,8 - 14,93^\circ$ und linksseitig zwischen $1,61 - 19,02^\circ$. Erneut konnte weder geschlechtsspezifisch (rechts: p-Wert: 0,8740; links: p-Wert: 0,9965) noch seitenspezifisch (Männer: p-Wert: 0,0633; Frauen: p-Wert: 0,4255) eine signifikante Korrelation mit dem Sagittalwinkel gezeigt werden.

gesamt	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel sag, re	8,25	3,79	45,99	8,39	0,80	14,93
Winkel sag, li	11,00	4,89	44,48	11,23	1,61	19,02

männlich	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel sag, re	8,15	3,84	47,08	8,39	0,80	14,92
Winkel sag, li	10,25	4,45	43,43	10,57	1,61	19,02

weiblich	Mittelwert [°]	σ [°]	rel. σ [%]	Median [°]	Min. [°]	Max. [°]
Winkel sag, re	8,53	3,80	44,50	8,89	2,93	14,93
Winkel sag, li	13,32	5,64	42,38	15,97	1,94	18,29

Tab. 10: Messergebnisse – Sagittalwinkel

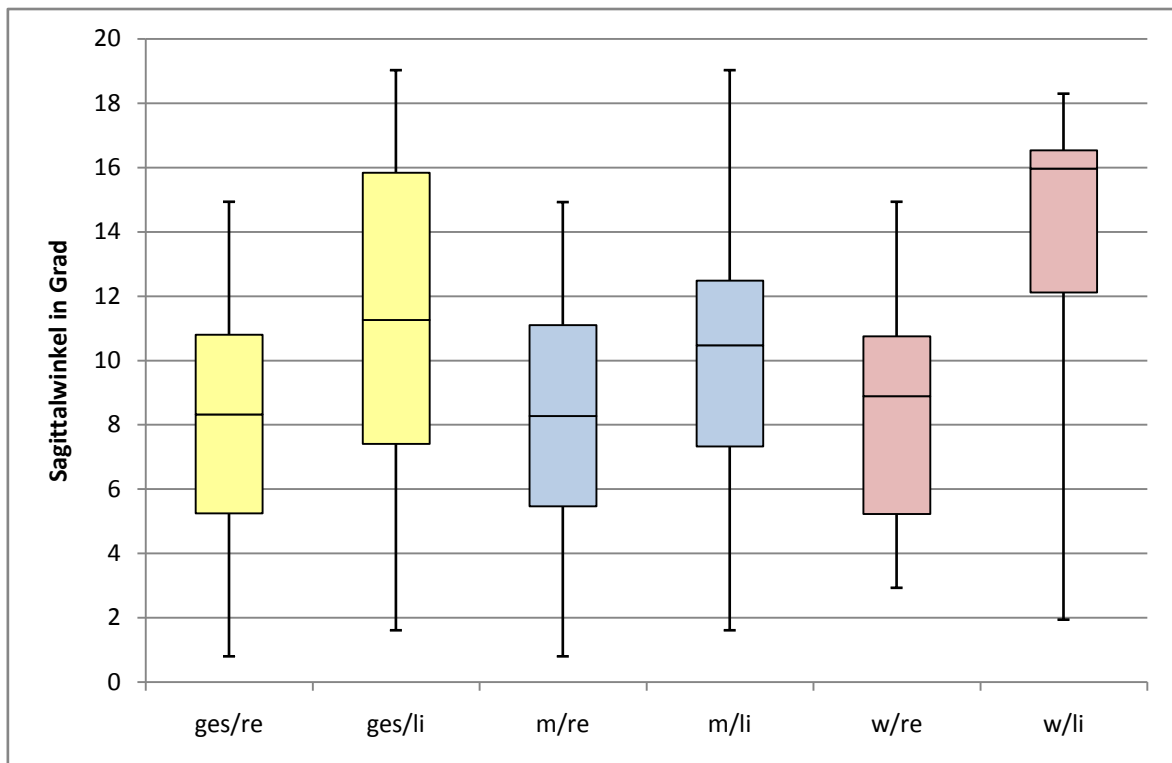


Abb. 20: Boxplot – Sagittalwinkel

4 Diskussion

Kernstück dieser Diplomarbeit ist die genaue Untersuchung der Morphometrie des Atlasrings in Bezug auf das Einbringen von Massa-lateralis-Schrauben sowie die Diskussion der Ergebnisse anhand der aktuellen Literatur.

Im Gegensatz zu einer präoperativen Planung am Nativ-CT bietet die 3D-Planung gerade bei nicht achsengerecht geschnittenen oder rekonstruierten CT-Bildern einen deutlichen Vorteil. Damit ließe sich vor einem Eingriff ein ausgezeichneter Überblick über die Verhältnisse knöcherner Strukturen erheben und zugleich eine Abschätzung über Länge, Durchmesser und Einbringwinkel der Schrauben errechnen. Diese Vorteile könnten sich unter anderem in einer Senkung der intraoperativen Komplikationsrate (Spinalkanalperforationen oder Vertebralisverletzungen durch Schrauben) widerspiegeln.

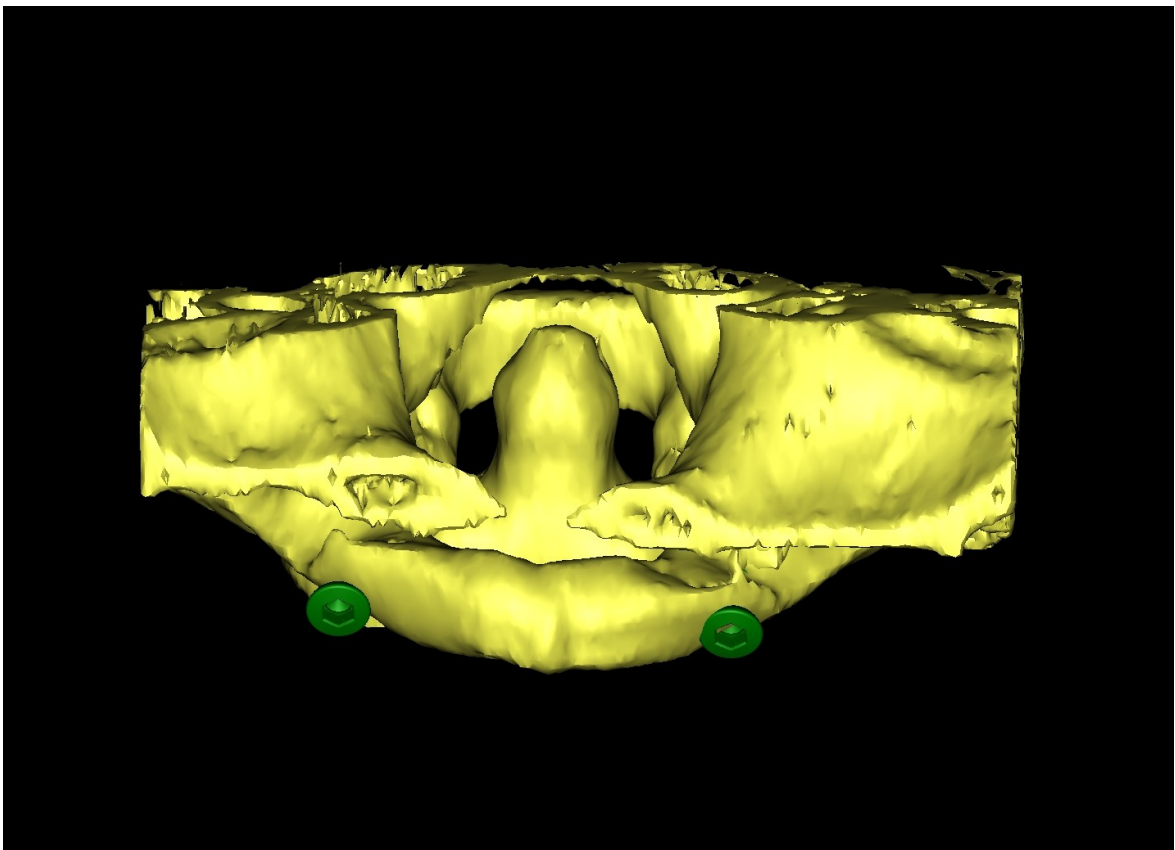


Abb. 21: 3D-Modell - Ansicht von dorsal

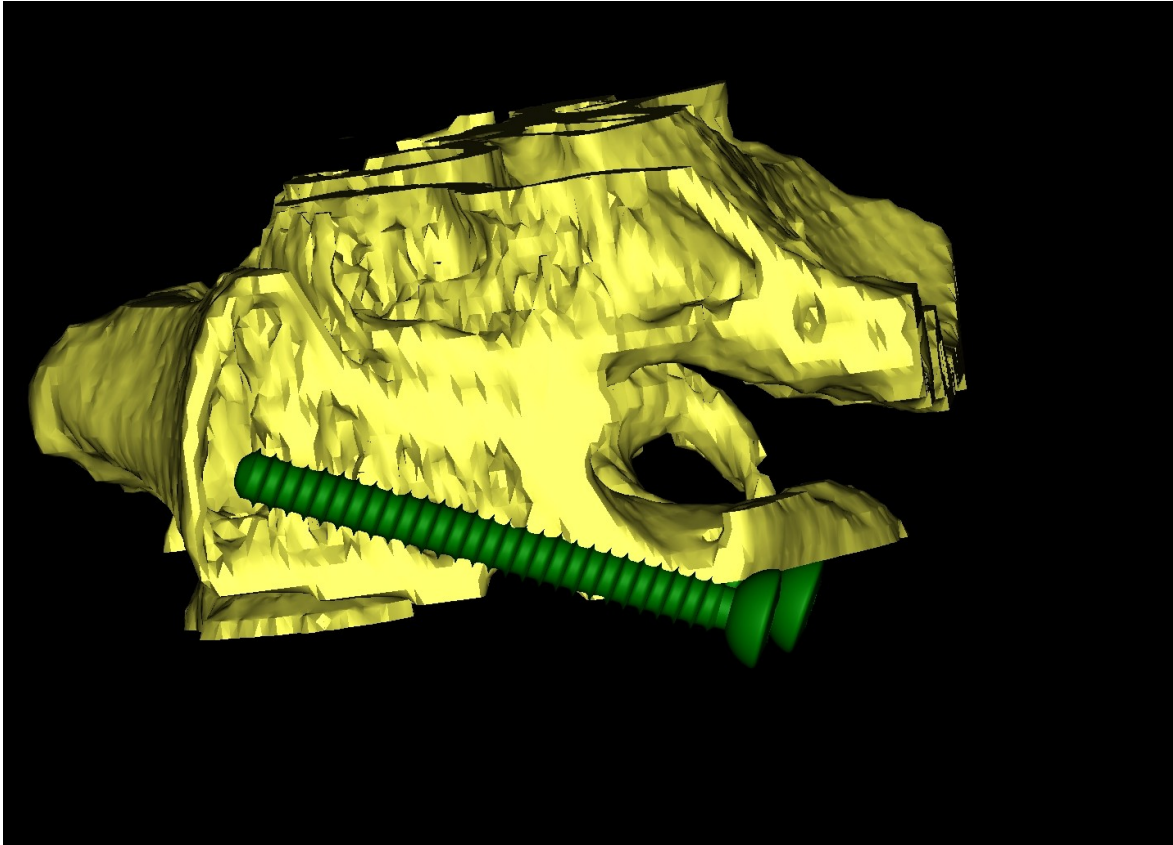


Abb. 22: 3D-Modell - Ansicht im Sagittalschnitt

Die Einbringstelle der Schraube wurde annähernd zentral über der Massa lateralis gewählt. Beim Verlauf wurde darauf geachtet, dass sie weder im Spinalkanal noch im Foramen transversarium zu liegen kommt. Die Länge wurde dabei so gewählt, dass sich die Schraubenspitze in der Kortikalis der Vorderseite des Wirbels befindet. (Dies ist auch in *Abb. 23: 3D-Modell - Ansicht im Sagittalschnitt* der Fall, da die Schrauben jedoch konvergieren, müsste man dieses Modell in einer tieferen Ebene schneiden, um die Schraubenspitze zu erfassen - dann wäre der Schraubenkopf nicht mehr auf der Abbildung.) Der Grund dafür liegt darin, dass dadurch der Halt der Schraube verstärkt wird, da diese dünne äußere Zone des Knochens eine erhöhte Festigkeit aufweist. Gerade bei kleinen Strukturen, wie eben der Massa lateralis, kommt dem eine große Bedeutung zu. (5)

Für die Schraubendicke wurde ein Durchmesser von 4 mm gewählt. In der Literatur werden diesbezüglich Werte von 3 - 4 mm (40) (5) angegeben, wobei es sich bei jenen Schrauben mit 3 mm (40) um polyaxiale handelt. Die Wahl des geeigneten Schraubendurchmessers richtet sich in erster Linie nach der Wirbelgröße. (5)

Betreffend der Lage fiel auf, dass sämtliche Massa-lateralis-Schrauben vom Ein- zum Austrittspunkt einen Anstieg verzeichnen. Außerdem wurde ersichtlich, dass ebenfalls zu 100 % eine Konvergenz der Schrauben besteht.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist ein weiterer sehr wichtiger Aspekt der Schraubeneinbringung, dass sie zur Gänze im Knochen liegt und nicht seitlich im Spinalkanal oder im Foramen transversarium vortritt und dadurch das Rückenmark bzw. die Arteria vertebralis gefährdet. Damit zu beiden Strukturen ein annehmbarer

Sicherheitsabstand erreicht wird, ist eine möglichst zentrale Lage der Schraube im Knochen wünschenswert. Tendenziell hat man diesbezüglich bei männlichen Patienten entsprechend ihrer Körpergröße auch einen etwas größeren Atlaswirbel und aufgrund dessen einen vermehrten Spielraum beim Einsetzen der Schraube.

Die erzielten Ergebnisse veranschaulichen dabei, dass die Massa-lateralis-Schraube in der Regel dem Spinalkanal näher als dem Foramen transversarium zu liegen kommt, wohingegen beim Einsetzen von Pedikelschrauben in den Axis laut *Bühren* üblicherweise das Gefäß einer größeren Gefahr ausgesetzt ist. Vergleicht man die Abstände der männlichen Patienten mit jenen der weiblichen, zeigen sich gemäß den Erwartungen bei den Männern geringfügig bessere Messwerte, eine signifikante Korrelation findet man jedoch ausschließlich rechtsseitig zwischen Geschlecht und Distanz der Massa-lateralis-Schraube zur Arteria vertebralis. Da dies bei den restlichen Werten nicht der Fall ist, ist dieses Ergebnis mit Vorbehalt zu interpretieren, da es sich möglicherweise nur um ein Zufallsereignis handelt. (5)

Der Vergleich mit Daten aus der Literatur ist bei diesem Thema insofern schwierig, als dass kaum Studien gefunden wurden, in denen die Autoren mit ähnlicher Genauigkeit die Lage von Massa-lateralis-Schrauben beschrieben. Einzig die Publikation *Posterior Osteosynthesis of the Atlas for Nonconsolidated Jefferson Fractures (Spine; 2011)* von *Abeloos et al.* enthielt ausführlichere Angaben zu Art und Einbringung der Schrauben. Gelegentlich kommt dabei noch, dass mit dem Zentrum der Massa lateralis der idente Eintrittspunkt für die Schrauben gewählt wurde. (40)

Mit einer Länge von 24 mm und einem Durchmesser von 3 mm (40) handelte es sich bei diesen um doch beträchtlich kleinere Schrauben, wenn man bedenkt, dass die kürzeste Schraube in dieser Diplomarbeit eine Länge von 25,69 mm aufwies und die Mittelwerte um die 30 mm lagen. Der Durchmesser wurde mit 4 mm schon allein aus dem Grund größer gewählt, weil derzeit keine kleineren Massa-lateralis-Schrauben – speziell bei den monoaxialen – in Gebrauch sind. Auch wenn diese Unterschiede in absoluten Zahlen nur minimal erscheinen, so kommt ihnen trotzdem entscheidende Bedeutung zu, bedenkt man die geringen Maße einer Massa lateralis (Durchmesser 15 - 20 mm) (5).

Der Transversalwinkel wird mit 20° (40) angegeben, was sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit, bei denen Mittelwerte um die 16° erhoben wurden, in Einklang bringen lässt. *Harms et al.* gaben ihrerseits Werte von 0 - 10° an, wobei in ihrer Studie *Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation (Spine; 2011)* die Massa-lateralis-Schrauben im Rahmen einer C1-C2 Fusion eingebracht wurden, was den deutlich flacheren Eintrittswinkel erklärt. (72)

Beim Sagittalwinkel gibt es hingegen größere Abweichungen. Dieser wird mit 30° (40) angegeben, während in dieser Arbeit Mittelwerte um die 10° ermittelt wurden. Selbst die Spitzenwerte überschritten dabei nicht 20°, was doch auf einen beträchtlich flacheren Verlauf der Schraube hinweist. Größere Übereinstimmung gibt es allerdings mit den Angaben in der Erstausgabe von *Bühren's Chirurgie der verletzten Wirbelsäule (Berlin; 2013)*, wo der Einbringwinkel nach kranial ebenfalls mit 10° angegeben wird. (5)

Bis dato gibt es keine einheitlichen Richtlinien, ab welchem Verletzungsgrad eine operative Behandlung indiziert ist bzw. wann eine konservative Therapie ausreicht. (4) Um diese Thematik genauer zu erläutern, wird die aktuelle Literatur zu diesem Thema erörtert.

Die Unterscheidung, ob es sich um eine stabile oder instabile Jefferson-Fraktur handelt, erfolgt anhand der Integrität des Ligamentum transversum atlantis. Eine Zerreißung dieses Bandes ist in Röntgenaufnahmen an

dem Auseinanderweichen der Massae laterales und einem vergrößerten atlantodentalen Abstand erkennbar. Diesbezüglich lautet der allgemeine Tenor, dass stabile Jefferson-Frakturen mit konservativen Maßnahmen auskuriert werden können. (40) (38) (4) (66) (47)

Operative Eingriffe werden bei Instabilität erforderlich, um die Entstehung irreversibler Inkongruenzen und den damit verbundenen schwerwiegenden Folgen (Bewegungseinschränkung, persistierender Schmerz) zu vermeiden. Neben den indirekten Rupturzeichen des Ligamentum transversum atlantis weisen darauf ausgeprägte Dislokationen der Frakturfragmente und im Extremfall sogar Absenkungen bzw. Schieflagen des Kopfes hin. (40) (4) (38) (4) (66) (47)

Erschwerend bei der Wahl der geeigneten Therapie ist wie gesagt die Tatsache, dass es an einer offiziellen Richtlinie mangelt, ab welchem Verletzungsausmaß ein operatives Vorgehen indiziert ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben dem Ligamentum transversum atlantis auch noch andere Strukturen, wie etwa die Ligamenta alaria oder die Gelenkscapseln, Stabilität bieten und damit in die Überlegung nach der adäquaten Therapie miteinbezogen werden müssen. (4) (33) (38) (49)

Es wurden auch Fälle beschrieben, in denen bildgebende Verfahren unmittelbar nach der Fraktur nur geringfügige Verschiebung der Knochenfragmente bzw. minimale Instabilität vermuten ließen, in deren weiterer Folge es jedoch zu sekundären Dislokationen kam. (28) Dies bekräftigt Befürworter einer raschen operativen Therapie, zeigt aber auch die Bedeutung regelmäßiger klinischer und radiologischer Kontrollen auf, wenn diese vom Patienten abgelehnt wird. (33)

Andererseits gibt es Dokumentationen, in denen von einer erfolgreichen konservativen Behandlung trotz augenscheinlicher Instabilität berichtet wurde. (39) Derartige Therapieentscheidungen gelten aber als überholt und entsprechen nicht der derzeitigen Lehrmeinung. Heutzutage handelt es sich bei solchen Situationen allenfalls um Ausnahmefälle, in denen z.B. instabile Berstungsbrüche übersehen wurden oder Patienten eine Operation ablehnten. (33) (40) (38)

Schlussendlich gibt es noch jene Autoren, nach deren Ansicht eine Kombination aus konservativer und operativer Therapie am erfolgversprechendsten ist. Sie befürworten eine präoperative Stabilisierung der HWS mit einem Halo-Fixateur für 8 Wochen und erst in dessen Anschluss ein operatives Vorgehen. (73) (74)

4.1 Nachwort

Abschließend sei noch erwähnt, dass unsere Technik der 3D-Rekonstruktion und 3D-Vermessung eine der akkuratesten derzeitigen Praktiken ist. Durch die dreidimensionale Darstellung der vorherrschenden anatomischen Gegebenheiten, inklusive Aberrationen, sowie der Möglichkeit der Simulation von Schrauben und anderen Fremdkörpern, hat sich dieses Verfahren auch schon bei anderen wissenschaftlichen Arbeiten als brauchbare Methode herausgestellt. Als Beispiele anzuführen sind etwa die von *Puchwein et al.* verfassten Studien *The three-dimensional morphometry of the odontoid peg and its impact on ventral screw osteosynthesis*, *Percutaneous fixation of acetabular fractures: computer-assisted determination of safe zones, angles and lengths for screw insertion* und *Computer-aided Analysis of Radial Head Morphometry*. In Anbetracht der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bleibt abzuwarten, welche innovativen Fortschritte in Zukunft noch präsentiert werden.

5 Literaturverzeichnis

1. Hadley MN, Dickman CA, Browner CM, Sonntag VK. Acute Traumatic Atlas Fractures: Management and Long Term Outcome. *Neurosurgery*. 1988 Jul;23(1):31-35
2. Segal LS, Grimm JO, Stauffer ES. Non-union of fractures of the atlas. *J Bone Joint Surg Am*. 1987 Dec;69(9):1423-1434
3. Ruf M, Melcher R, Harms J. Transoral Reduction and Osteosynthesis C1 as a Function-Preserving Option in the Treatment of Unstable Jefferson Fractures. *Spine*. 2004;29(7):823-827
4. Tessitore E, Momjian A, Payer M. Posterior Reduction and Fixation of an Unstable Jefferson Fracture with C1 Lateral Mass Screws, C2 Isthmus Screws, and Crosslink Fixation: Technical Case Report. *Neurosurgery*. 2008 Jul;63:100-101
5. Bühren V, Josten C. *Chirurgie der verletzten Wirbelsäule*. 1st ed. Berlin: Springer; 2013. p. 138, 152, 164-167
6. Wang S, Wang C, Wood KB, Yan M, Zhou H. Radiographic Evaluation of the Technique for C1 Lateral Mass and C2 Pedicle Screw Fixation in Three Hundred Nineteen Cases. *Spine*. 2011 Jan 1; 36(1):3-8
7. Kingdom TT, Nockels RP, Kaplan MJ. Transoral-transpharyngeal approach to the craniocervical junction. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1995 Oct; 113(4):393-400
8. Vilela MD, Jermani C, Braga BP. C1 lateral mass screws for posterior segmental stabilization of the upper cervical spine and a new method of three-point rigid fixation of the C1-C2 complex. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*. 2006 Sep;64(3B):762-767
9. Anderhuber F, Pera F, Streicher J. *Waldeyer Anatomie des Menschen*. 19th ed. Berlin: de Gruyter; 2012. p. 117-121, 125, 127-130, 493, 752-753, 759, 1008, 1023-1025
10. Kapandji IA. *Funktionelle Anatomie der Gelenke*. 5th ed. Stuttgart: Thieme; 2009. p. 4, 146
11. Graf M, Grill C, Wedig HD. *Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule*. 1st ed. Steinkopff Verlag; 2009. p.141-142
12. Aumüller G, Aust G, Doll A, Engele J, Kirsch J, Mense S, et al. *Duale Reihe Anatomie*. 2. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2010. p. 223-226, 236
13. Platzer W. *Taschenatlas Anatomie*. 10th ed. Stuttgart: Thieme; 2009. p. 38-39, 60-63

14. Rohen JW, Lütjen-Drecoll E. Funktionelle Embryologie. 3rd ed. Stuttgart: Schattauer; 2006. p. 53
15. Ulfig N. Kurzlehrbuch Embryologie. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2009. p. 59
16. Tscherne H, Blauth M. Unfallchirurgie - Wirbelsäule. 1st ed. Berlin: Springer; 1998. p. 74, 386
17. Junewick JJ, Chin MS, Meesa IR, Ghorri S, Boynton SJ, Luttenton CR. Ossification Patterns of the Atlas Vertebra. American Journal of Roentgenology. 2011 Nov;197(5):1229-1234
18. AuYong N, Piatt J. Jefferson fractures of the immature spine. Pediatrics. 2009 Jan;3:15-19
19. Brossmann J, Czerny C, Freyschmidt J. Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen in der Radiologie des kindlichen und erwachsenen Skeletts. 14th ed. Stuttgart: Thieme; 2001. p. 554
20. Scherer H. Das Gleichgewicht. 2nd ed. Berlin: Springer; 1997. p. 499
21. Stelzenmüller W, Wiesner J. Therapie von Kiefergelenkschmerzen. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2010. p. 143
22. Bohndorf K, Imhof H, Fischer W. Radiologische Diagnostik der Knochen und Gelenke. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2006. p. 320
23. kopfgelenke.org.
24. Lindel K. Muskeldehnung. 2nd ed. Berlin: Springer; 2010. p. 178
25. Müller-Mai CM, Ekkernkamp A. Frakturen - Klassifikation und Behandlungsoptionen. 1st ed. Berlin: Springer; 2010. p. 248-250
26. Haupt WF, Jochheim KA, Renschmidt H. Neurologie und Psychiatrie. 9th ed. Stuttgart: Thieme; 2002. p. 86
27. Knoop M, Kröger JC, Schulz K, Ascher PW, Schareck W, Witter K, Höppner J. Diagnose und Notfallmanagement einer intraoperativen Verletzung der Arteria vertebralis. Chirurg. 1999;70:789-794
28. Bransford R, Falicov A, Nguyen Q, Chapman J. Unilateral C-1 lateral mass sagittal split fracture: an unstable Jefferson fracture variant. Spine. 2009 May;10:466-473
29. Katzenschlager R et al. Duplexsonographie der Gefäße. 2nd ed. Gablitz: Krause und Pachernegg GmbH, Verlag für Medizin und Wirtschaft; 2005. p. 30-3130. schäberle.

31. Widder B, Görtler M. Doppler- und Duplexsonographie der hirnversorgenden Arterien. 6th ed. Berlin: Springer; 2004. p. 266
32. Schurr PH. So that was life: a biography of Sir Geoffrey Jefferson. Royal Society of Medicine Press. 1997. p. 130
33. Haus BM, Harris MB. Case report - Nonoperative Treatment of an Unstable Jefferson Fracture Using a Cervical Collar. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2008;466:1257-1261
34. Krämer J. Orthopädie und orthopädische Chirurgie. 1st ed. Stuttgart: Thieme; 2004. p. 424
35. Börm W, Meyer F. Spinale Neurochirurgie - Operatives Management von Wirbelsäulenerkrankungen. 1st ed. Stuttgart; 2009. p. 125
36. Baierlein SA. Frakturklassifikationen. 1st ed. Stuttgart: Thieme; 2011. p.132
37. Li L, Teng H, Pan J, Qian L, Zeng C, Sun G, et al. Direct Posterior C1 Lateral Mass Screws Compression Reduction and Osteosynthesis in the Treatment of Unstable Jefferson Fractures. *Spine*. 2011 Jul;36(15):1046-1051
38. Kakarla UK, Chang SW, Theodore N, Sonntag VKH. Atlas Fractures - Post-traumatic Conditions. *Neurosurgery*. 2010 Mar;66(3):60-67
39. Levine AM, Edwards CC. Fractures of the Atlas. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1991 Jun; 73(5):680-691
40. Abeloos L, De Witte O, Walsdorff M, Delpierre I, Bruneau M. Posterior Osteosynthesis of the Atlas for Nonconsolidated Jefferson Fractures. *Spine*. 2011;36(20):1360-1363.
41. Kesterson L, Benzel E, Orrison W, Coleman J. Evaluation and treatment of atlas burst fractures (Jefferson fractures). *J Neurosurg*. 1991 Aug; 75(2):213-20
42. Fowler JL, Sandhu A, Fraser RD. A review of fractures of the atlas vertebra. *J Spinal Disord*. 1990 Mar; 3(1):19-24
43. Gleizes V, Jacquot FP, Signoret F, Feron JMG. Combined injuries in the upper cervical spine: clinical and epidemiological data over a 14-year period. *Spine*. 2000; 9:386-392
44. Hirner A, Weise K. Chirurgie. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2008. p. 337-339

45. Ryan MD, Henderson JJ. The epidemiology of fractures and fracture-dislocations of the cervical spine. *Injury*. 1992; 23(1):38-40
46. Jefferson G. Fractures of the first cervical vertebra. *The British Medical Journal*. 1927 Jul; pp 153-157
47. Tan J, Li L, Sun G, Qian L, Yang M, Zeng C, et al. C1 Lateral Mass-C2 Pedicle Screws and Crosslink Compression Fixation for Unstable Atlas Fracture. *Spine*. 2009;34(23):2505-2509
48. Dickman C, Green K, Sonntag V. Injuries Involving the Transverse Atlantal Ligament: Classification and Treatment Guidelines Based upon Experience with 39 Injuries. *Neurosurgery*. 1996 Jan;38(1):44-50
49. Fielding JW, van B. Cochran G, Lawsing JF III, Hohl M. Tears of the Transverse Ligament of the Atlas: A Clinical and Biomechanical Study. *Journal of Bone & Joint Surgery - American Volume*. 1974 Dec;56(8):1683-1691
50. Panjabi MM, Oda T, Crisco JJ 3rd, Oxland TR, Katz L, Nolte LP. Experimental study of atlas injuries. I. Biomechanical analysis of their mechanisms and fracture patterns. *Spine*. 1991 Oct;16(10):460-465
51. Han SY, Witten DM, Mussleman JP. Jefferson fracture of the atlas. Report of six cases. *Journal of Neurosurgery*. 1976 Mar; 44(3): 368-371
52. Chung SK, Park JT, Lim J, Park J. Open Posterior Reduction and Stabilization of a C1 Burst Fracture Using Mono-axial Screws. *Spine*. 2011;36(5):301-306
53. Jang JW, Lee JK, Hur H, Seo BR, Lee JH, Kim SH. Vertebral artery injury after cervical spine trauma: A prospective study using computed tomographic angiography. *Surg Neurol Int*. 2001; 2: 39
54. Torina PJ, Flanders AE, Carrino JA, Burns AS, Friedman DP, Harrop JS, Vaccaro AR. Incidence of Vertebral Artery Thrombosis in Cervical Spine Trauma: Correlation with Severity of Spinal Cord Injury. *Am J Neuroradiol* 2005 Nov-Dec; 26:2645-2651
55. Muratsu H, Doita M, Yanagi T, Sekiguchi K, Nishida K, Tomioka M, Kurosaka M. Cerebellar infarction resulting from vertebral artery occlusion associated with a Jefferson fracture. *J Spinal Disord Tech*. 2005 Jun; 18(3): 293-296. walsh.
57. Unterharnscheidt F, Doerr W, Uehlinger E, Seifert G. *Pathologie des Nervensystems VI.B: Traumatologie von Hirn und Rückenmark*. 1st ed. Berlin: Springer; 1993. p. 154-156
58. Hopf HC, Kömpf D. *Erkrankungen der Hirnnerven*. 1st ed. Stuttgart: Thieme; 2006. p. 235

59. Engelhardt GH. Unfallheilkunde: Ein Leitfaden für Klinik und Praxis. 3rd ed. Berlin: de Gruyter; 1998. p. 226-231
60. Wirth CJ, Mutschler W, Bischoff HP, Püschmann H, Neu J. Komplikationen in Orthopädie und Unfallchirurgie. 1st ed. Stuttgart: Thieme; 2010. p. 441
61. Mattle H, Mumenthaler M. Neurologie. 13th ed. Stuttgart: Thieme; 2013. p. 40
62. Dahmer J. Anamnese und Befund. 10th ed. Stuttgart: Thieme; 2006. p. 428-431
63. Imhoff AB, Linke RD, Baumgartner R. Checkliste Orthopädie. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2011. p. 311
64. Schmidt M. Röntgeneinstelltechniken. 1st ed. Berlin: ABW Wissenschaftsverlag; 2008. p. 18
65. Vogl TJ, Reith W, Rummeny EJ. Diagnostische und Interventionelle Radiologie. 1st ed. Berlin: Springer; 2011. p. 329-331
66. Spence KF, Decker S, Sell KW. Bursting atlantal fracture associated with rupture of the transverse ligament. *J Bone Joint Am.* 1970 Apr; 52(3):543-549
67. Suss RA, Zimmerman RD, Leeds NE. Pseudospread of the atlas: false sign of Jefferson fracture in young children. *AJR Am J Roentgenol.* 1983 Jun; 140(6):1079-1082
68. Laubenberger T, Laubenberger J. Technik der medizinischen Diagnostik. 7th ed. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag; 1999. p. 367
69. Al-Holou WN, Park P, Wang AC, Than KD, Marentette LJ. Modified trans-oral approach with an inferiorly based flap. *Journal of Clinical Neuroscience.* 2010 Apr; 17(4):464-468
70. Magerl F, Seemann PS. Stable Posterior Fusion of the Atlas and Axis by Transarticular Screw Fixation. *Cervical Spine I.* 1987, pp 322-327
71. Suchomel P, Stulik J, Klězl Z, Chrobok J, Lukás R, Krbec M, Magerl F. Transarticular fixation of C1-C2: a multicenter retrospective study. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech.* 2004; 71(1):6-12
72. Harms J, Melcher RP. Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine.* 2001 Nov 15;26(22):2467-71
73. Schlicke LH, Callahan RA. A rational approach to burst fractures of the atlas. *Clin Orthop Relat Res.* 1981 Jan-Feb; 154:18-21

74. O'Brien JJ, Butterfield WL, Gossling HR. Jefferson fracture with disruption of the transverse ligament. A case report. *Clin Orthop Relat Res.* 1977 Jul-Aug; 126: 135-138
75. Dick W. *Notfall- und Intensivmedizin.* 2nd ed. Berlin: deGruyter; 2001. p. 74
76. Kapoor V, Watts B, Theruvil B, Boeree NR, Fairhurst J. Delayed displacement of a paediatric atlas fracture through the synchondrosis after minor trauma. *Injury.* 2004 Dec; 35(12):1308-1310
77. Geusens E, Van Breuseghem I, Pans S, Brys R. Some tips and tricks in reading cervical spine radiographs in trauma patients. *JBR-BTR.* 2005 Mar-Apr; 88(2):87-92

