

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

Anteriore Pedikelschrauben an der subaxialen Halswirbelsäule. Ein anatomisch experimenteller Ansatz

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Arne Harland
aus Gießen

promoviert am 10. April 2025

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
2025

Dekan: **Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink**
1. Gutachter: **Professor Dr. med. J. Bredow**
2. Gutachter: **Privatdozent Dr. med. S. Fürderer**

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten

Herr Prof. Dr. med. Jan Bredow

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die Operationen an den Körperspendern wurden durch Herrn Prof. Dr. Bredow durchgeführt. Die radiologischen Messungen wurden sowohl von Herrn Prof. Dr. Bredow als auch von mir durchgeführt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 19.03.2024

Unterschrift:
Arne Harland

Danksagung

Ich danke meiner Ehefrau Philine Marie Harland für die Motivation zur Durchführung der Doktorarbeit.

Weiterhin danke ich meiner Schwester Frauke Jacobs für Korrekturen und Motivationen.

Insbesondere danke ich Jan Bredow für seine Geduld und meine stetige Förderung.

Für meine Eltern.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
1. ZUSAMMENFASSUNG	9
2. EINLEITUNG	10
2.1 Anatomie der Halswirbelsäule	10
2.1.1 Anatomie subaxiale Halswirbelsäule	11
2.1.2 Cervical-Kanal	11
2.1.3 Cervicales Myelon und Nervenwurzeln	12
2.1.4 Facettengelenke	12
2.1.5 Discus vertebrae und Anulus fibrosus	12
2.1.6 Ligamentäre Strukturen	12
2.2 Säulenmodell nach Denis	13
2.3 Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule	13
2.4 Stabilitätskriterien der Halswirbelsäule	15
2.5 Wirbelkörperfusionstechniken und operative Stabilisierungen an der Halswirbelsäule	15
2.6 Dorsale Operationstechniken der subaxialen Halswirbelsäule	15
2.6.1 Dorsaler Zugang zur subaxialen Halswirbelsäule	15
2.6.2 OP-Technik Massa lateralis Schrauben	16
2.6.3 OP-Technik Pedikel Schrauben	17
2.7 Ventrale Operationstechniken der subaxialen Halswirbelsäule	17
2.7.1 Ventraler Zugang zur subaxialen Halswirbelsäule	18
2.7.2 Anteriore Fusionsverfahren	18
2.8 Operative Therapie der subaxialen Halswirbelsäulen-Verletzungen	19
2.9 Komplikationen der operativen Therapien	19
2.10 Zielsetzung	20
3. MATERIAL UND METHODEN	21
3.1 Geräte und Software	21
3.1.1 Hardware	21

3.1.2 OP-Materialien	21
3.1.3 Software	22
3.2 Körperspender	22
3.3. CT 3D Navigation	23
3.4 Operativer Versuchsaufbau	27
3.5 Anatomische Messung der Wirbelkörper	28
3.5.1 Messung der Pedikelwinkel	28
3.5.2 Messung der Maximalen Schraubenlänge	28
3.5.3 Messung der Pedikelweite	29
3.5 Radiologische Auswertung der Schraubenlage	30
3.6 Statistische Auswertung	31
4. ERGEBNISSE	32
4.1. Pedikelweite	32
4.2. Maximale mögliche Schraubenlänge	33
4.3. Pedikelwinkel in Grad	34
4.4. Schraubenlage [Modifiziert n. Gertzbein und Robins]	36
5. DISKUSSION	39
5.1 Anatomie der Pedikel, Nervenwurzeln und A. vertebralis	39
5.2 Navigierte Schraubenimplantation	40
5.3 Schraubenlage	41
5.4 Navigierte anteriore Pedikelschrauben	43
6. LITERATUR	45
7. ANHANG	51
7.1 Abbildungsverzeichnis	51
7.2. Tabellenverzeichnis	52

Abkürzungsverzeichnis

ACDF	anterior cervical discectomy and fusion
ATPS	anterior transpedicular screws
A.	Arteria
a.p.	anterior posterior
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V.
C1	„Atlas“, erster Halswirbel
C2	„Axis“, zweiter Halswirbel
C3	dritter cervicaler Wirbel
C4	vierter cervicaler Wirbel
C5	fünfter cervicaler Wirbel
C6	sechster cervicaler Wirbel
C7	siebter cervicaler Wirbel
CT	Computertomographie
ES	Ösophagus
HWS	Halswirbelsäule
HWK	Halswirbelkörper
K-Draht	Kirschnerdraht
LC	Musculi longus colli
LF	Ligamentum flavum
LLA	Ligamentum longitudinale anterius
LLP	Ligamentum longitudinale posterius
Lig	Ligamentum
Mm.	Musculi
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
M.	Musculus
OP	Operation
Proc.	Processi
TR	Trachea
3D	dreidimensional

1. Zusammenfassung

Mit der aktuellen demographischen Entwicklung und Alterung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland muss davon ausgegangen werden, dass Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule in den kommenden Jahren zunehmen werden ¹. Ebenfalls nimmt hierdurch die Anzahl degenerativ bedingter Halswirbelsäulen-Operationen zu. Die Behandlung von Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule richtet sich nach dem Ausmaß der Verletzung und der Stabilität ^{2,3}. Sind alle 3 Säulen der Halswirbelsäule nach Denis betroffen, ist zusätzlich zu einer ventralen Versorgung eine dorsale Spondylodese indiziert ^{3,4}. An der Halswirbelsäule sind dorsale Eingriffe im Vergleich zu den ventralen Eingriffen mit einer zweifach erhöhten Mortalität verbunden ⁵. Weiterhin besteht bei den dorsalen Eingriffen ein höherer Blutverlust und häufiger tiefe Wundinfektionen ⁶⁻⁸. Ziel der Arbeit ist eine rein ventrale Spondylodese mit Pedikelschrauben zu etablieren. Mit der ATPS steht dem Operateur eine weitere Option zur Behandlung von Verletzungen und degenerativer Veränderungen an der Halswirbelsäule zur Verfügung.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde durch die Arbeitsgruppe von Bredow et al. eine reproduzierbare und zuverlässige Messmethode von Pedikelschrauben an der Halswirbelsäule entwickelt. Mit dieser wurde die Schraubenlage von ATPS, die in Kunstknochen eingebracht wurden untersucht. Die hier sehr vielversprechenden Ergebnisse wurden dann in unserer Arbeit am Humanpräparat bestätigt. Wir konnten in dieser Arbeit zeigen, dass die Pedikelschrauben, die von anterior eingebracht wurden, den von dorsal eingebrachten Schrauben nicht unterliegen. Dies ermöglicht instabile Verletzungen aller drei Säulen der Halswirbelsäule von anterior zu versorgen. Die oben genannten intra- und postoperative Komplikationen mit erhöhtem Blutverlust und Wundinfektionen könnten reduziert werden. Durch einen einzeitigen Eingriff kann das Narkoserisiko gesenkt und die gesamte OP-Zeit verkürzt werden. In Kombination mit einer winkelstabilen ventralen Platte könnte die Stabilität noch gesteigert werden.

Da es sich um eine experimentelle Arbeit handelt und Leichenpräparate eine exklusive und seltene Ressource sind müssen in der Zukunft weitere Versuche mit ATPS durchgeführt werden. Bis zur Etablierung einer neuen OP-Technik mit ATPS müssen insbesondere große Patientenkollektive und anwendbare Settings untersucht werden.

2. Einleitung

2.1 Anatomie der Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule des Menschen besteht aus sieben Halswirbeln (vertebrae cervicales). Funktionell wird die Halswirbelsäule in drei Zonen unterteilt: die subokzipitale Zone, die zwischen den occipitalen Condylen und dem Atlas (C1) liegt, eine vom Axis (C2) gebildete Übergangszone und die subaxiale Zone, teilweise auch typische Zone genannt, die C3 bis einschließlich den C7-Wirbel umfasst^{9,10}.

In der sagitalen Ansicht weist die cervicale Wirbelsäule typischerweise eine lordotische Krümmung auf¹¹.

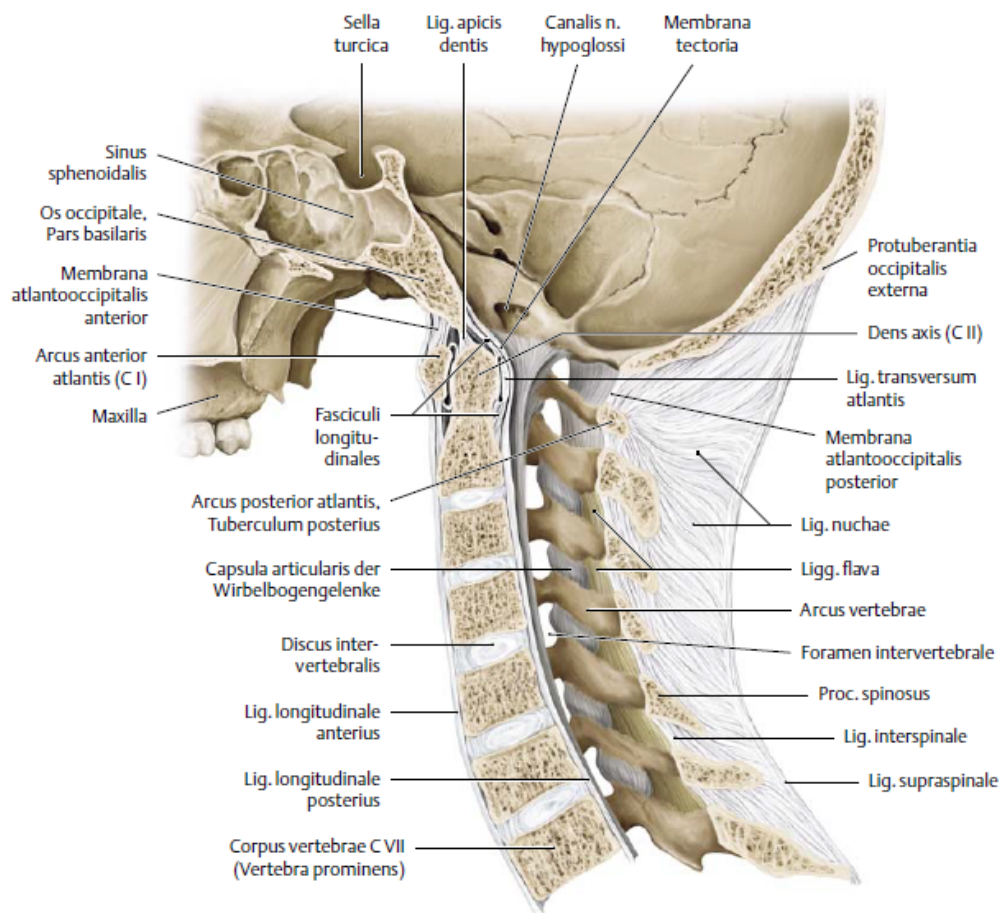


Abbildung 1: Median-sagittal Schnitt der cervicalen Wirbelsäule mit Anteilen des Craniums¹².

2.1.1 Anatomie subaxiale Halswirbelsäule

Die subaxiale Halswirbelsäule beginnt mit dem dritten Halswirbel und endet nach dem siebten Halswirbelkörper.

Der typische subaxiale corpus vertebrae ist würfelförmig und begrenzt seitlich durch die Processi uncinati die kraniale Bandscheibe. Lateral schließen sich die Processi transversi an, die jeweils ein Foramen transversarium und die dadurch verlaufende Arteria vertebralis enthalten. Der Pediculus arcus vertebrae ist schmal und bildet mit der Lamina arcus vertebrae den Arcus vertebrae. Der Processus spinosus ist im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule häufig zweigeteilt ¹².

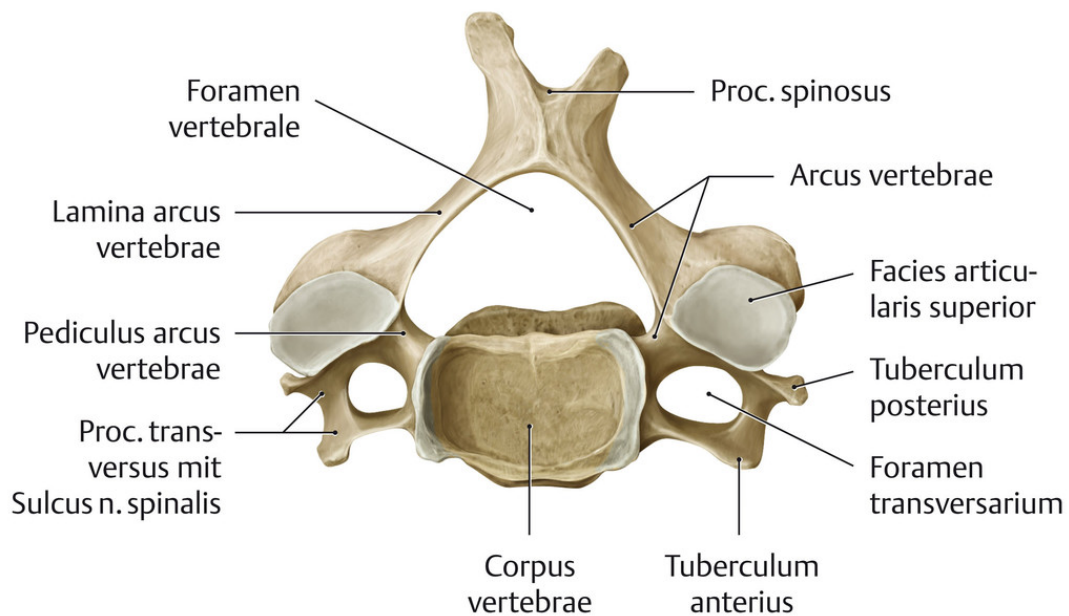


Abbildung 2: Aufsicht auf einen „typischen“ Halswirbelkörper ¹².

2.1.2 Cervical-Kanal

Der Wirbelkanal wird anterior begrenzt durch den Wirbelkörper und die dazwischen liegenden Bandscheiben, lateral durch die Pedikel und posterior durch die Laminae und das Ligamentum flavum ¹².

Durch den Cervical-Kanal verläuft das Rückenmark, dem auf den einzelnen Wirbelkörpersegmenten Nervenwurzeln entspringen.

2.1.3 Cervicales Myelon und Nervenwurzeln

Das Rückenmark verläuft durch den Spinalkanal und hat im Querschnitt die Form einer Ellipse. Im Bereich des cervicalen Spinalkanals vergrößert der Durchmesser sich bis zu C4 / C5 und nimmt dann ab ¹³.

Diese Vergrößerung ist hier durch das vermehrte Nervengewebe, den Plexus brachialis, zu erklären.

Bei C2 beträgt der durchschnittliche Durchmesser 110 mm², bei C4 121,9 mm² und bei C7 84,6 mm² ^{14,15}. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Durchmesser weder mit dem Alter, dem Gewicht noch dem Geschlecht korreliert ^{13,15}.

2.1.4 Facettengelenke

Das Facettengelenk (Zygapophysengelenk) ist im Gegensatz zur Bandscheibe ein echtes Synovialgelenk. Obwohl es in begrenztem Umfang zur Unterstützung der Wirbelsäule beiträgt, besteht die Hauptfunktion dieses Gelenks darin, die Stabilität der Wirbelsäule aufrechtzuerhalten, indem die Richtung der Wirbelbewegung gesteuert wird, eine Funktion, die von der Ebene der Facettengelenkoberfläche abhängt, die über die verschiedenen Abschnitte der Wirbelsäule variiert.

2.1.5 Discus vertebrae und Anulus fibrosus

Der Discus vertebrae (Bandscheibe) verbindet die Wirbelkörperendplatten und besteht aus einem zentralen Nucleus Pulposus, der physiologisch viskos und geleeartig ist und von Anulus fibrosus-Fasern umgeben ist ¹⁶. Er weist eine hohe Kollagenzusammensetzung mit einem zunehmenden Anteil an Elastin in der Nähe der knorpeligen Endplatten auf ¹⁷. Seitlich begrenzt wird die Bandscheibe durch den Processus Uncinatus und bildet mit diesem ein Uncovertebralgelenk.

2.1.6 Ligamentäre Strukturen

Neben den Bandscheiben sind die Wirbelkörper der subaxialen Halswirbelsäule über Bandstrukturen miteinander verbunden. Die beiden größten Bänder sind zum einen das Lig. Longitudinale anterius (LLA), das ventral der Wirbelkörper verläuft und das Lig. Longitudinale posterius (LLP), das auf der Rückseite des Wirbelkörpers im Spinalkanal verläuft ^{18,19}. Beide weisen eine ähnliche Zusammensetzung auf, wobei diese aus ungefähr 67% Kollagen- und 6% Elastinfasern bestehen ¹⁷.

Weiterhin sind oberflächliche Schichten des LLP und die ventrale Dura mater durch fibrinhaltiges Gewebe miteinander verbunden ¹⁷.

Weitere wichtige Stabilisatoren sind die Kapselbänder, die die Facettengelenke umhüllen und in einem 90° Winkel zu den Gelenkflächen verlaufen ²⁰, sowie das Ligamentum Flavum (LF),

das sowohl Stabilität erzeugt, als auch Schutz für die neuronalen Strukturen ²¹ bietet. Unter physiologischen Bedingungen ermöglicht das elastische Ligamentum Flavum eine Verlängerung der Wirbelsäule, ohne Rückenmark oder Nervenwurzeln zu komprimieren ²⁰.

Das zervikale LF bedeckt den größten Teil der Laminaoberfläche und reicht von dem oberen Drittel einer Lamina bis zum Oberrand der darunterliegenden Lamina ¹⁶.

Die interspinösen und supraspinösen Bänder verbinden die einzelnen Proc. Spinosi und begrenzen damit die Wirbelsäulenflexion ²⁰.

2.2 Säulenmodell nach Denis

Die Klassifikation und Behandlung von Wirbelsäulenverletzungen basiert auf dem 1983 von Denis veröffentlichten 3-Säulenmodell ²².

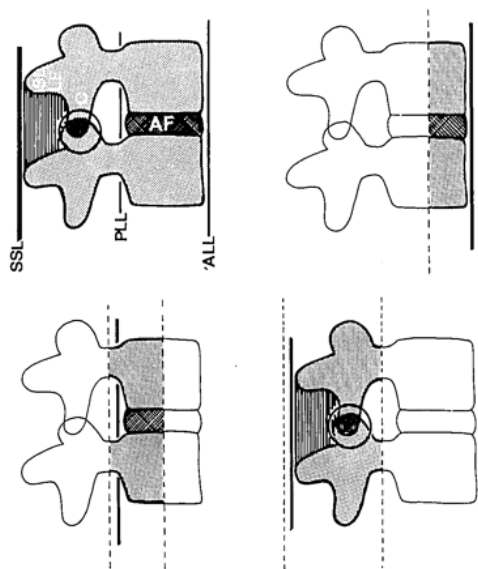


Abbildung 3: 3-Säulenmodell nach Denis ²².

Das Modell nach Denis unterteilt die Wirbelsäule in 3 anatomische Bereiche oder Säulen. Dabei schließt die vordere oder ventrale Säule das LLA sowie die vorderen zwei Drittel des Wirbelkörpers mit ein, die mittlere Säule das hintere Drittel des Wirbelkörpers und das LLP, und die hintere oder dorsale Säule die Wirbelbögen, die Facettengelenke und die dorsale Zuggurtung, bestehend aus Lig. Supraspinale, Lig interspinale, Lig. Flavum und Facettenkapsel mit ein ²².

2.3 Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule

Die Inzidenz von Halswirbelsäulenverletzungen bei schweren Unfällen liegt in der Bundesrepublik Deutschland bei 3,5% ²³. Unterteilt man die Verletzungen an der

Halswirbelsäule in die Abschnitte obere und subaxiale Wirbelsäule entfallen über 60% der Verletzungen auf die subaxiale Halswirbelsäule ²⁴.

Die Hauptrisikogruppen für Verletzungen sind zum einen junge Menschen im Alter von 20 bis 45 Jahre, sowie als zweiter Gipfel Menschen im Alter von 70 bis 80 Jahre ¹.

Wirbelkörperfrakturen entstehen bei physiologischer Knochensubstanz nur durch eine beträchtliche Krafteinwirkung ²⁵. Bei degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule oder systemischen Erkrankungen mit Beteiligung des Knochens, wie bei einer Osteoporose oder malignen Erkrankungen, reichen allerdings bereits geringe Krafteinwirkungen um pathologische Frakturen zu erzeugen ²⁶⁻²⁸.

Somit lässt sich die zweigipfelige Altersverteilung durch die häufigere Verwicklung in Hochrasanztraumata und Stürze aus großer Höhe bei jungen Menschen zum einen und durch degenerative und systemische Erkrankungen wie Osteoporose oder maligne Erkrankungen in der älteren Gruppe erklären ^{1,23,26}.

Die Behandlung von Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule richtet sich nach dem Ausmaß der Verletzung. Dabei hat sich die AO Spine Klassifikation als Standard etabliert ^{2,3}.

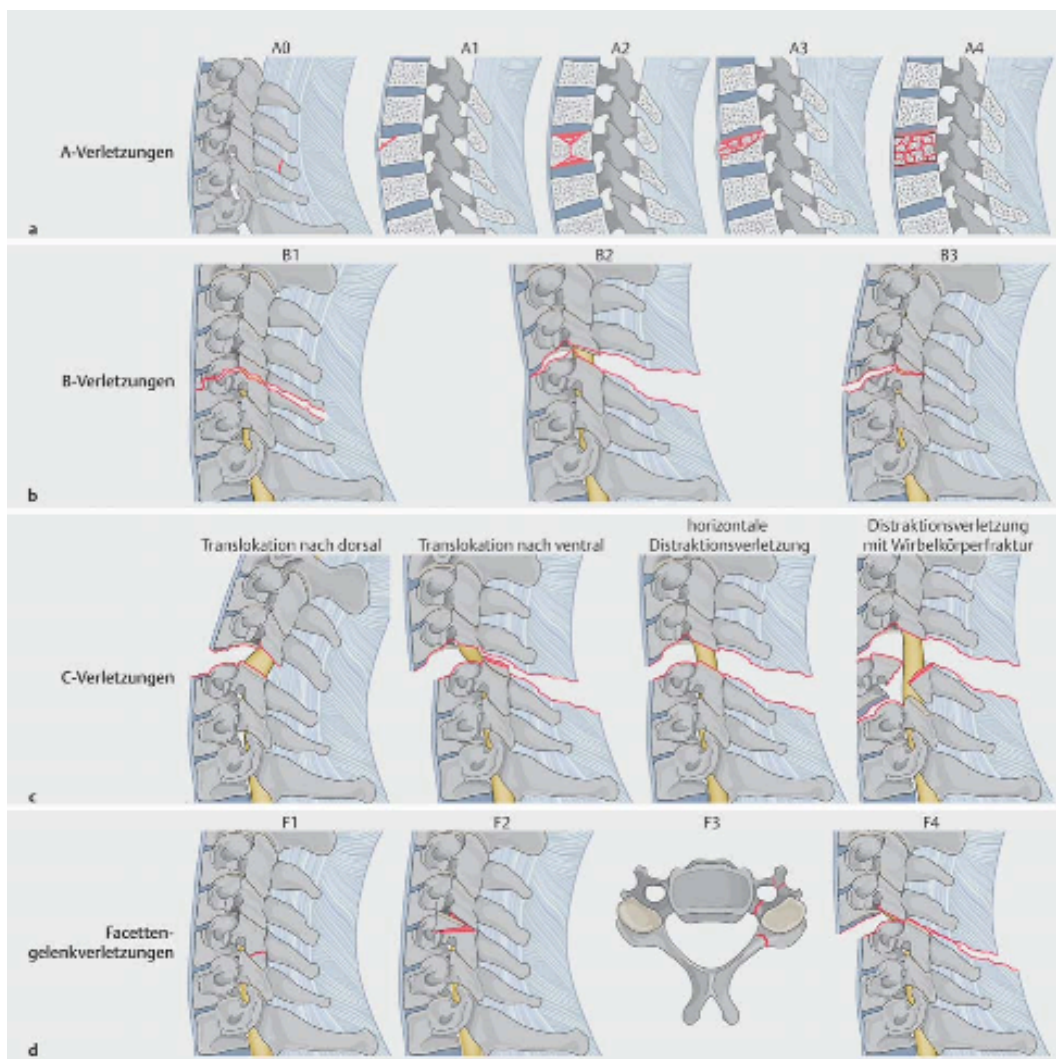


Abbildung 4: AO Spine Klassifikation der subaxialen Halswirbelsäulenverletzung ³.

2.4 Stabilitätskriterien der Halswirbelsäule

Stabilitätskriterien an der Halswirbelsäule dienen als Grundlage für die Therapie der jeweiligen Pathologie²⁹. Dabei werden die Grundlagenforschungen von Panjabi und White als Grundlage zur Beurteilung der Stabilität an der subaxialen Halswirbelsäule genommen^{20,30}.

Im deutschsprachigen Raum wurde in der AWMF Leitlinie für Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule anhand dieser eine Definition für Instabilitäten konkret festgelegt³.

Dabei kommt den Facettengelenken eine große Bedeutung zu. Als Instabilität wird gewertet, wenn ein Facettengelenk subluxiert oder frakturiert ist, mit einer Fehlstellung von über 10 Millimetern oder mehr als 40% der Gelenkfläche betroffen sind. Weiterhin ist eine Translation von über 3,5 Millimetern in sagittaler Richtung und eine Änderung des mono- oder bisegmentalen Grund-Deckplatten-Winkel über 15° zum Normalwert als Instabilität zu werten.

2.5 Wirbelkörperfusionstechniken und operative Stabilisierungen an der Halswirbelsäule

Versteifungen der Wirbelsäule mittels Spondylodese dienen der Verbindung (Fusion) angrenzender Wirbelkörper. Dabei sind im Jahr 2018 in Deutschland rund 71.000 Spondylodesen registriert worden³¹.

Generell unterscheiden muss man zum einen die dorsalen Verfahren und zum anderen die ventralen Verfahren.

Im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule werden über einen dorsalen Zugang zum einen sogenannte Massa Schrauben wie auch Pedikelschrauben angewendet.

Über einen ventralen Zugang ist als Wirbelkörperfusion die ACDF (anterior cervical discectomy and fusion) das häufiger angewendete Verfahren im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule⁷. Mit den dorsalen und den ventralen Verfahren kann der Spinalkanal entlastet werden.

2.6 Dorsale Operationstechniken der subaxialen Halswirbelsäule

2.6.1 Dorsaler Zugang zur subaxialen Halswirbelsäule

Die Operation wird in Bauchlage durchgeführt, wobei der Kopf des Patienten in einer Kopfklemme („Mayfield“) fixiert wird. Je nach Operationshöhe muss gegebenenfalls der Haaransatz rasiert werden, um eine sterile Abdeckung des OP-Gebietes zu gewährleisten. Zur Lokalisation der Operationshöhe und zur Kontrolle, ob mit der erfolgten Lagerung die Pedikel der zu operierenden Segmente darstellbar ist, erfolgt vor dem Desinfizieren und Abdecken des Patienten mit dem Bildwandler eine radiologische Kontrolle in der seitlichen und in der a.p. Ebene.

Anschließend erfolgt ein Hautschnitt über der Mittellinie und eine Präparation beidseits des Dornfortsatzes bis auf die Wirbelbögen. Dabei werden die kleinen Nackenmuskeln beidseits an den Processi spinosi abgelöst. Es erfolgt anschließend eine Darstellung bis an die Facettengelenke lateral, ohne diese zu eröffnen ³². Dabei erhält man einen Aufblick auf die inferioren Anteile der Massa lateralis.

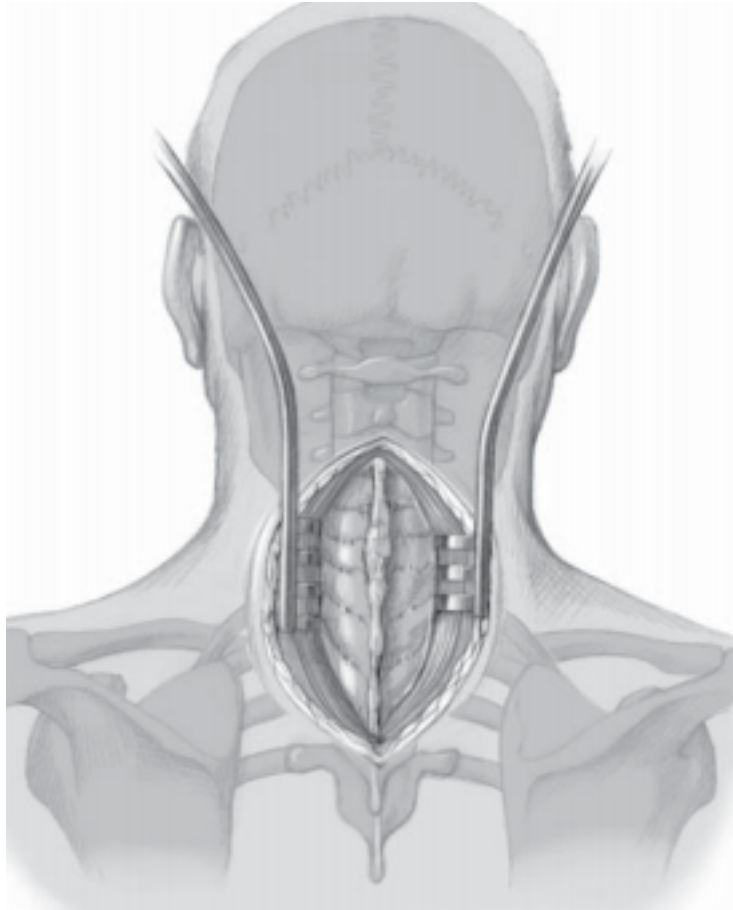


Abbildung 5: Aufsicht auf die dorsale subaxiale Halswirbelsäule mit Dornfortsätzen und Wirbelbögen. Die Nackenmuskulatur ist über die eingebrachten Spreizer zu beiden Seiten verdrängt ³³.

2.6.2 OP-Technik Massa lateralis Schrauben

Bei dieser Technik werden die dargestellten inferioren Anteile der Massa lateralis in Quadranten durch eine gedachte zentrale, horizontale und vertikale Linie unterteilt.

Der Eintrittspunkt der Schrauben liegt jeweils im oberen äußeren Quadranten. Die Bohrrichtung erfolgt in einem 25° nach lateral abweichendem Winkel. Nach radiologischer Kontrolle der korrekten Lage werden die Schrauben mit einem Stab verbunden ³⁴.

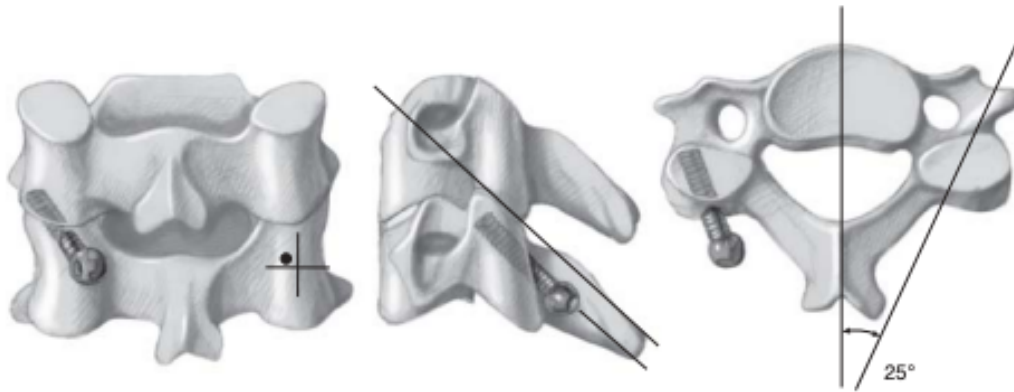


Abbildung 6: Anatomischer Eintrittspunkt und Verschraubungswinke der Massa lateralis Schrauben im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule ³³.

2.6.3 OP-Technik Pedikel Schrauben

Pedikelschrauben im Bereich der subaxialen HWS werden in der Regel computernavigiert durchgeführt ³. Dabei ist der Eintrittspunkt lateral gelegen und die Bohrrichtung erfolgt mit einer 45° Konvergenz nach medial. Dabei sollten Pedikelschrauben im Bereich der HWS mittels CT Navigation eingebracht werden ^{35,36}.



Abbildung 7: Anatomischer Eintrittspunkt und Verschraubungswinke der Pedikel Schrauben im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule ³³

2.7 Ventrale Operationstechniken der subaxialen Halswirbelsäule

Der anteriore Zugang zur Halswirbelsäule wurde erstmals in den 1950er Jahren beschrieben ³⁷ und hat sich in den folgenden Jahren zu einem Standardeingriff entwickelt. Dabei ist es wichtig, die anatomischen Strukturen im Bereich des operativen Zugangs zu kennen und zu schonen, um Komplikationen zu vermeiden ³⁸.

2.7.1 Ventraler Zugang zur subaxialen Halswirbelsäule

Die Lagerung des Patienten erfolgt in Rückenlage, wobei der Kopf in einer Kopf-Nackenstütze gelagert und das Kinn redressiert wird. Zur Lokalisation der Operationshöhe und zur Kontrolle, ob mit der erfolgten Lagerung die Pedikel der zu operierenden Segmente darstellbar sind, erfolgt vor dem Desinfizieren und Abdecken des Patienten mit dem Bildwandler eine radiologische Kontrolle in der seitlichen und in der a.p. Ebene.

Der Hautschnitt erfolgt nach Smith und Robinson ³⁹ entlang der Mittellinie (Kinn, Kehlkopf, Sternum) mit einem rechtsseitigen Kragenschnitt. Dabei erfolgt die Schnittlänge bis einen Zentimeter nach kontralateral und ipsilateral bis über den gut tastbaren M. sternocleidomastoideus. Nach Identifikation des Platysmas wird dieses längs eröffnet.

Im Anschluss erfolgt eine stumpfe Präparation in die Tiefe wobei die A. Carotis (lateral) und der Ösophagus (medial) als seitliche Leitstrukturen dienen.

Der M. longus colli wird beidseits nach lateral mit geeigneten Spreizern nach lateral verdrängt. Anschließend kann mit dem Bildwandler eine Höhenbestimmung der zu operierenden Segmente erfolgen.

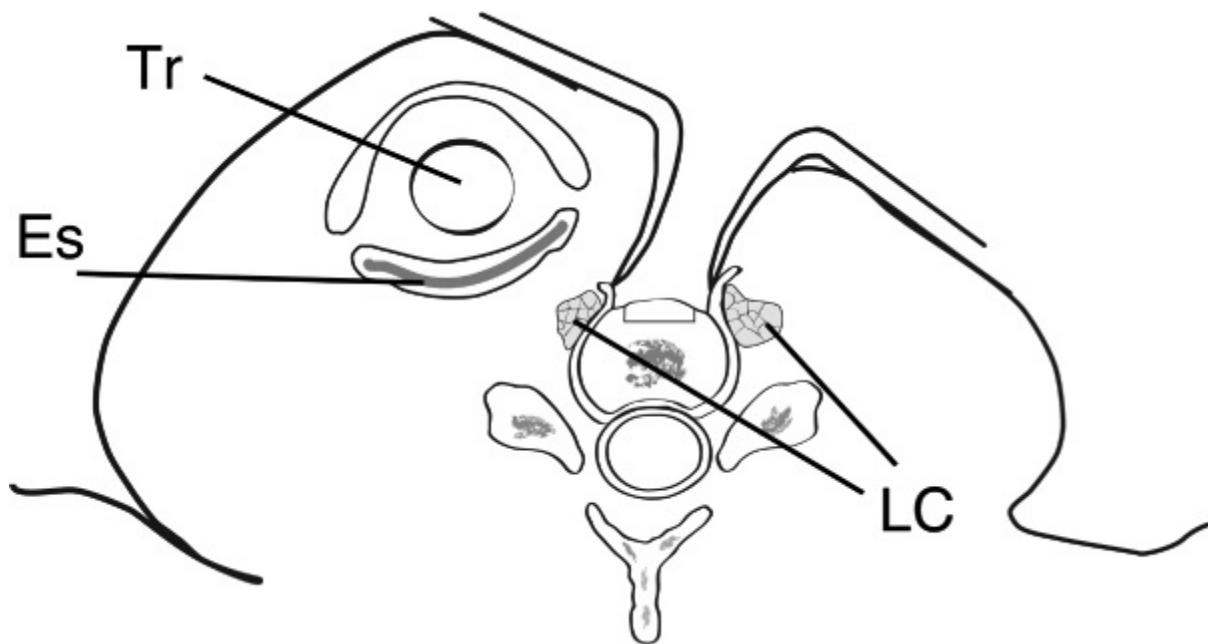


Abbildung 8: Axialer Querschnitt des Zugangs nach Smith und Robinson mit eingebrachten Spreizern an den Mm. Longus colli (LC). Markiert sind weiterhin Ösophagus (Es) und Trachea (Tr) ³⁹.

2.7.2 Anteriore Fusionsverfahren

Die anterioren „Standard-Fusionsverfahren“ unterscheiden sich hauptsächlich nach dem Ausmaß der zu operierenden Segmente.

So ist bei der Fusion von einem Segment häufig ein Bandscheibenersatz mit einem Kunststoff- oder Titan Cage oder Knochenspan ausreichend stabil. Werden Wirbelkörper entnommen, muss gegebenenfalls eine additive ventrale Platte zur Sicherung der Stabilität eingebracht werden.

Da diese aber nur begrenzt Stabilität geben können, werden diese Verfahren in einigen Fällen durch dorsale Verfahren ergänzt.

Experimentell wurde von Koller et al.⁴⁰ als zusätzliche Fixierungsmethode eine Technik mit einer anterioren Pedikelschraube entwickelt.

Dabei ist der Zugang dem der Standardverfahren im Bereich der ventralen Wirbelsäuleneingriffe gleich⁴⁰.

In ersten Studien konnte die Arbeitsgruppe zeigen, dass es die anatomischen Begebenheiten einer anterioren Pedikelschraube möglich machen und biomechanisch mit dorsalen Verschraubungen vergleichbar sind⁴¹.

In weiteren Studien wurde die bisher experimentelle Methode weiter erforscht und insbesondere im Hinblick auf eine Implantation der Schraube an Knochenmodellen sowie Körperspendern untersucht⁴²⁻⁴⁴.

Die zunächst nur fluroskopisch eingebrachten, experimentellen anterioren Pedikelschrauben wurden schließlich von Patton et al CT-navigiert eingebracht⁴⁵, wobei eine Verbesserung der Schraubenlagen berichtet wurde.

2.8 Operative Therapie der subaxialen Halswirbelsäulen-Verletzungen

Im Bereich der operativen Behandlung der traumatischen Verletzungen an der subaxialen HWS ist die dorsale Spondylodese dann erforderlich, wenn alle 3 Säulen der Halswirbelsäule betroffen sind^{3,4}.

Dabei können viele Pathologien von ventral behandelt werden, erfordern aber zusätzlich eine dorsale Spondylodese zur Stabilisierung. Die alleinige ventrale Stabilisierung an der Halswirbelsäule ist bisher nur indiziert, wenn sich Pathologien auf die ventralen Anteile des Wirbelkörpers oder die Bandscheibe beziehen^{3,46}.

2.9 Komplikationen der operativen Therapien

Aktuelle Studien zeigen eindrücklich den Unterschied der Komplikationen und der Mortalität im Vergleich der dorsalen und ventralen Eingriffe an der subaxialen Halswirbelsäule⁵.

Unter Einbezug der Komorbiditäten sowie weiteren demographischen Variablen konnten Memtsoudis et al. eine zweifach erhöhte Mortalität bei den posterioren Eingriffen im Vergleich zu den ventralen Eingriffen feststellen⁵.

Im direkten Vergleich der beiden Verfahren (ventrale und dorsale Versorgung der HWS) ist die dorsale Versorgung aber auch mit häufigeren und schwerwiegenderen Komplikationen verbunden. Dabei sind insbesondere ein höherer Blutverlust und tiefe Wundinfektionen beschrieben ⁶⁻⁸.

Der ventrale Ansatz hat insgesamt weniger und auch insgesamt weniger schwerwiegende Komplikationen ^{5,6,8}.

2.10 Zielsetzung

Ziel unserer experimentellen Untersuchung war die Entwicklung einer neuen Operationsmethode zum Einbringen von CT-navigierten anterioren Pedikelschrauben, um den anterioren Zugangsweg mit insgesamt weniger Komplikationen intra- und postoperativ zu nutzen ⁴⁷ und eine alternative Behandlungsmethode zu zweizeitigen Eingriffen an der Halswirbelsäule zu ermöglichen.

Zur Vorbereitung war durch unsere Arbeitsgruppe eine Machbarkeitsstudie an Kunstknochen erfolgt ⁴⁸.

Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

Wie kann die Schraubenlage zervikaler Pedikelschrauben objektiv bewertet und verglichen werden?

Wie ist die Präzision von 3D-Fluoro-navigiert platzierten Schrauben an der dorsalen HWS beim aktuellen Standardverfahren?

Gibt es eine sichere und von der Präzision her vergleichbare Möglichkeit, Pedikelschrauben von ventral einzubringen, wobei die Vorteile der geringeren Invasivität des anterioren Zugangs genutzt werden?

Ist die entwickelte Technik am humanen Präparat anwendbar und bietet sie dabei eine suffiziente Genauigkeit und Lagequalität der unter Verwendung eines 3D-Fluoroskopie-Navigationssystems eingebrachten ATPS?

3. Material und Methoden

3.1 Geräte und Software

3.1.1 Hardware

Hardware	Beschreibung	Hersteller
Arcadis Orbic 3D	3D C-Bogen zur intraoperativen Bildgebung mittels Röntgenstrahlen	Siemens Erlangen Deutschland
Brainlab Curve	Navigation Infrarotkamera und Navigationsmonitore	BrainLAB AG, München, Deutschland

Tabelle 1: Hardware

3.1.2 OP-Materialien

OP-Material	Beschreibung	Hersteller
3,5 x 36mm DensAccess (siehe Abb. 10)	Kanülierte Schrauben, mit 3,5 Millimeter Durchmesser und 36 Millimetern Länge	Depuy Synthes, Norderstedt, Deutschland
Chirurgiemotor Colibri II (siehe Abb. 8)	Bohrmaschine	DePuy Synthes, Norderstedt, Deutschland
K-Draht 1,2mm mit Dreikantspitze (siehe Abb. 8)	Kirschnerdraht zur Führung der kanülierten DensAccess Schrauben	DePuy Synthes, Norderstedt, Deutschland
Getriebeschraubenzieher abgewinkelt B 3,5 mm	Durchbohrter Schraubenzieher, um DensAccess Schrauben über einen K-Draht eindrehen zu können	DePuy Synthes, Norderstedt, Deutschland

Tabelle 2: Op-Materialien

3.1.3 Software

Software	Beschreibung	Hersteller
IMPAX EE	3D-Rekonstruktion und Analysesoftware von radiologischer Bildgebung	Agfa HealthCare GmbH, Bonn, Deutschland
VectorVision Fluoro 3D Trauma Software	3D Darstellung der CT Navigation intraoperativ; Schnittstelle zwischen CT und Patient während der Navigation	BrainLAB AG, München, Deutschland
Microsoft Excel	Tabellenkalkulationsprogramm	Microsoft Corporation One Microsoft Way Redmond, WA USA
SPSS Statistics	Statistische Analysesoftware	IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland

Tabelle 3: Software

3.2 Körperspender

Die Körperspender sind frischgefrorene Leichenpräparate aus dem Anatomischen Institut der Universität zu Köln.

Es handelt sich um 4 Halswirbelsäulen.

Es wurden nativradiologische Frakturen, sowie Osteolysen in den Präparaten ausgeschlossen. Für den Versuch wurden die Körperspender für 24 Stunden bei Zimmertemperatur aufgetaut und während des Versuchs mit in Kochsalzlösung getränkten Tüchern abgedeckt, um ein Austrocknen des Gewebes zu verhindern.

3.3. CT 3D Navigation

Für die CT gesteuerte 3D Navigation wird der Patient, in unserem Fall die anatomischen Präparate, auf dem OP-Tisch sicher gelagert und fixiert.

Zur Verbindung der Navigation mit dem zu operierenden Präparat muss eine Referenz an dem Präparat fixiert werden (siehe Abbildung 6).

Da die Navigation nicht für ventrale Wirbelsäuleneingriffe konzipiert ist, musste hier eine individuelle Lösung geschaffen werden.

Bei der dorsalen HWS 3D Navigation wird die Referenz mit einer Klemme an einem Proc. Spinosus des zu operierenden Patienten sicher fixiert. Für unseren Versuch wurde ein individuelles Verbindungsstück erstellt, das mit dem Caspar Spreizer verbunden wird (siehe Abbildung 7).

Anschließend erfolgt mit dem Arcadis Orbic 3D-C-Bogen eine intraoperative CT Aufnahme. Dabei verlässt das Team den OP-Saal. Zuvor wird ausführlich kontrolliert, dass die relevanten Abschnitte der Präparate im Bildbereich liegen und keine störenden, zum Beispiel artefaktbildenden Metallteile, das Präparat bedecken.

Das dreidimensionale Bild errechnet sich aus 100 Röntgenbildern, die bei einer 190° Rotation des C Bogens automatisch erstellt werden.

An dem Arcadis Orbic 3D-C-Bogen sind ebenfalls Infrarotlicht reflektierende Markierungen fixiert. Über eine Kamera können somit während der intraoperativen CT-Aufnahme der C-Bogen von Arcadis, als auch das Präparat mit der Referenz von der Navigationssoftware von Brainlab erkannt werden.

Schließlich muss, um navigiert bohren zu können, eine Bohrhülse mit Infrarotlicht reflektierenden Markierungen registriert werden (Siehe Abbildung 8).



Abbildung 9: BrainLAB Curve mit der Navigationseinheit mit 2 Monitoren links im Bild und Schwenk-Arm mit 2 Infrarotkameras und Steuerhandgriff hinten rechts im Bild.

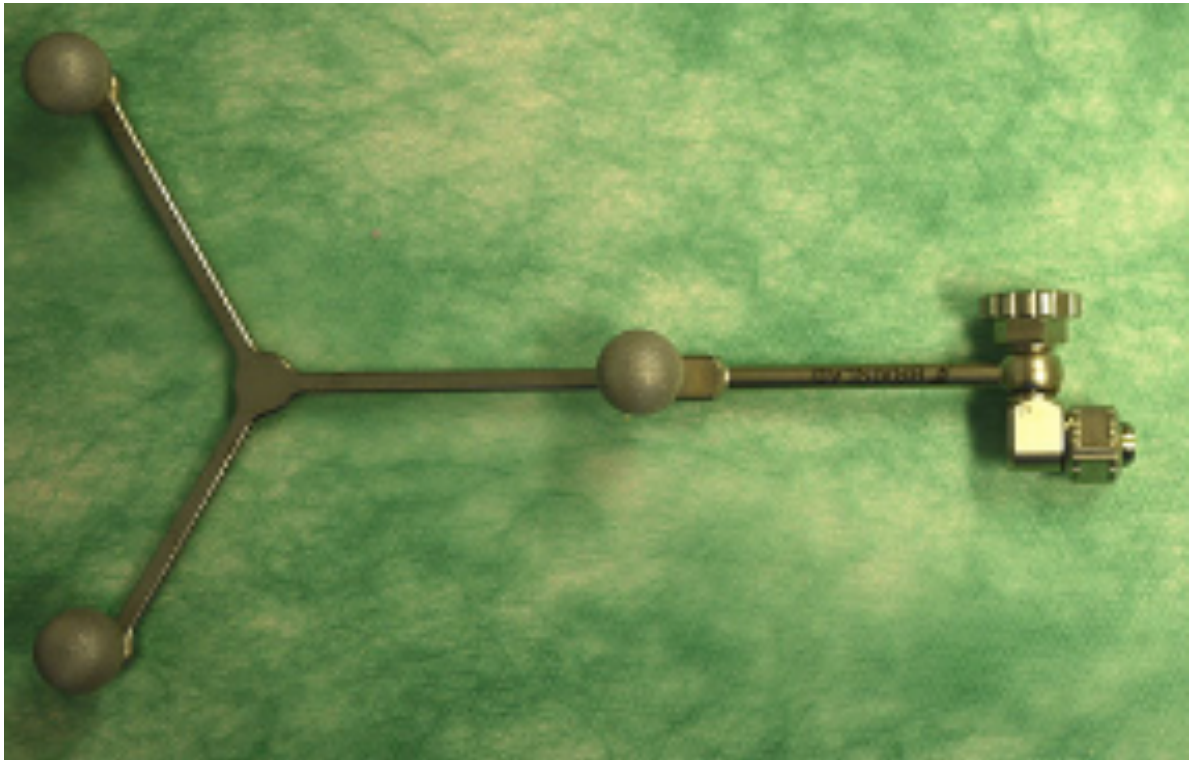


Abbildung 10: Referenz mit 3 Infrarotlicht reflektierenden Kugeln ^{47,48}

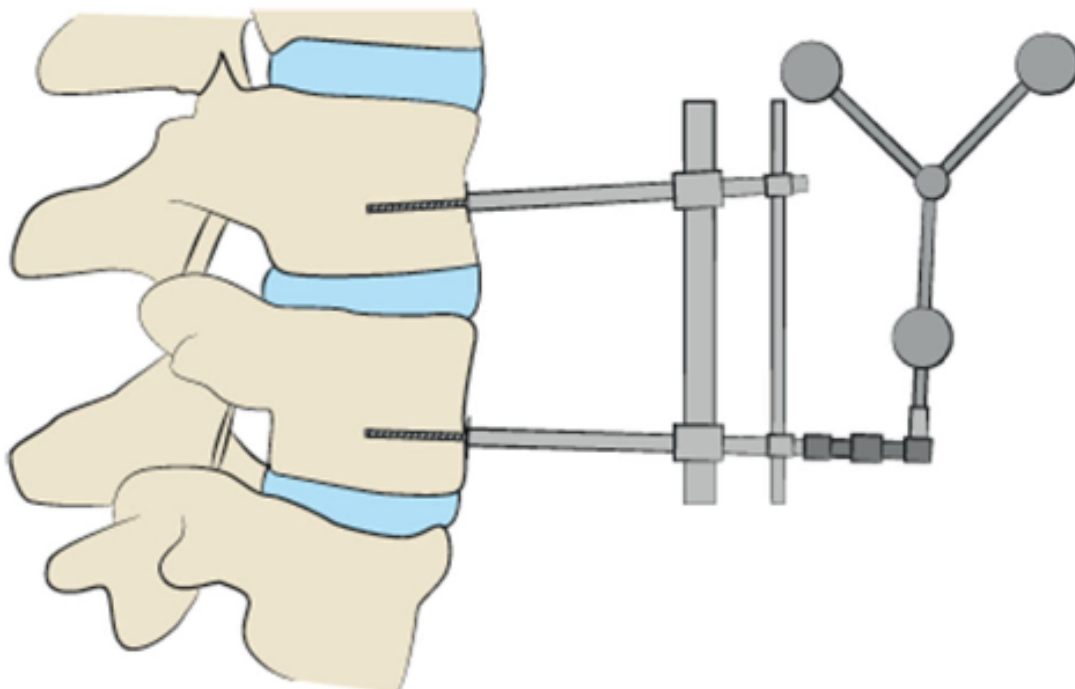


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Caspar Spreizers der über 2 Schanzschrauben in ventrale Wirbelkörper eingebracht wurde. An diesem ist über das dunkelgrau hervorgehobene individuelle Verbindungsstück die Referenz fixiert ⁴⁷.

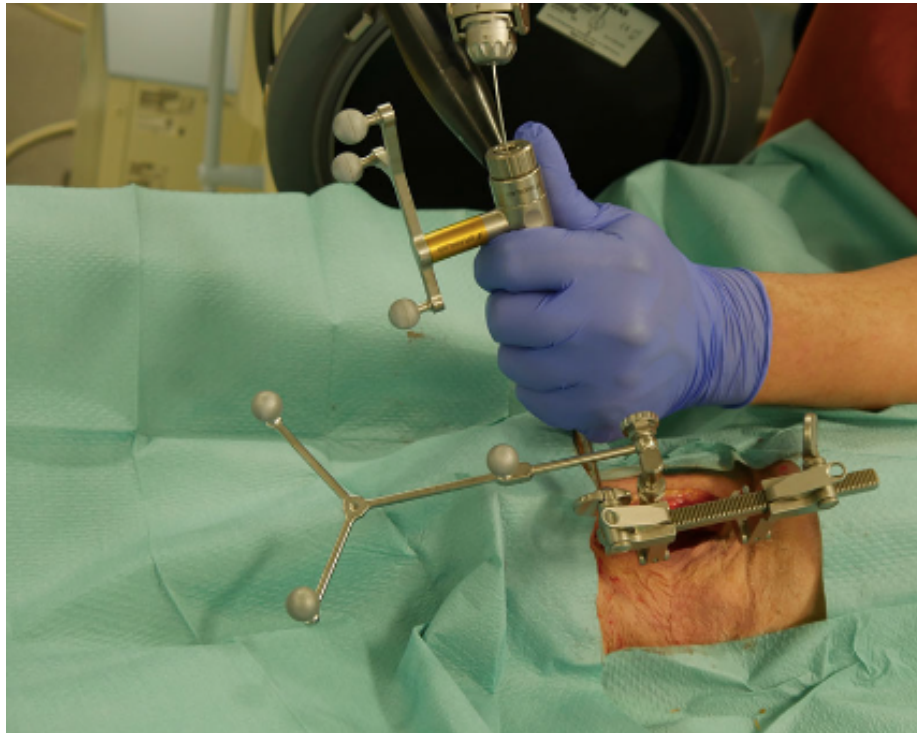


Abbildung 12: Caspar Spreizer mit fixierter Referenz im anatomischen Präparat (unten im Bild), oben im Bild die Bohrmaschine mit K-Draht und Bohrhülse mit Referenzkugeln ⁴⁷.

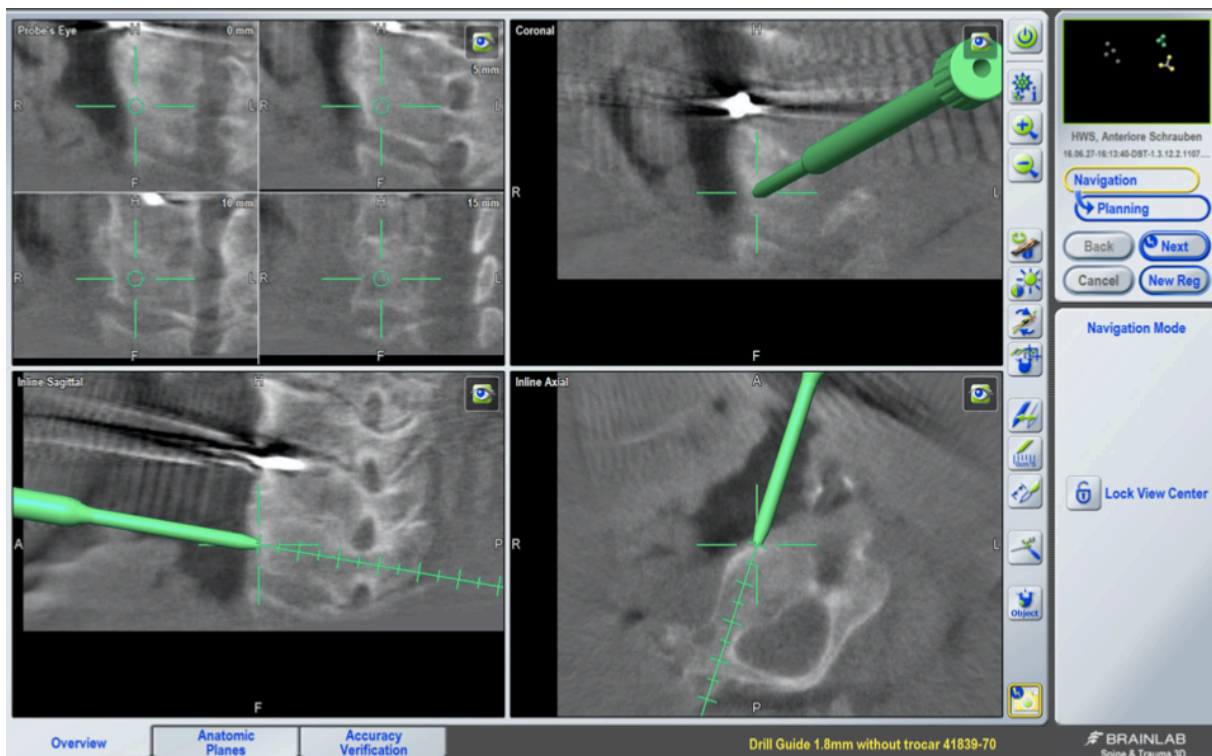


Abbildung 13: Intraoperative Navigation mit links oben einer Übersichtsaufnahme, rechts oben eine Ansicht von ventral (coronar), links unten eine seitliche Ansicht (sagital), und rechts unten eine Aufsicht (axial) auf den zu operierenden Wirbelkörper. Dabei ist der Pointer grün dargestellt und im Anschluss ein ebenfalls grünes Zentimetermaß zur Bestimmung einer möglichen Schraubenlänge ⁴⁷

3.4 Operativer Versuchsaufbau

Die Lagerung der anatomischen Präparate erfolgte fixiert in Hyperextension in einer Vakuummatratze.

Zur Darstellung des OP-Gebietes wurde ein ventraler Hautschnitt (Kragenschnitt) rechts der Mittellinie durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Präparation medial des M. sternocleidomastoideus und lateral des Ösophagus.

Nachdem die Muskelbäuche des M. longus colli nach medial und lateral abgespreizt wurden, erfolgte eine radiologische Höhenkontrolle mit dem Bildwandler.

Nach Bestimmung der Wirbelkörper cervical 4 und 6 wurde in diese eine Schanzschraube eingebracht. Im Anschluss wurde der Caspar Spreizer auf die Schanz-Schrauben fixiert (siehe Abbildung 10) und die Referenz an diesem angebracht.

Nach Einrichtung der Navigation wurden in 18 Wirbelkörper über die navigiert eingebrachten 1,2mm K-Drähte DensAccess Schrauben eingebracht.

Insgesamt konnten vier Schrauben nicht navigiert eingebracht werden, da der einliegende Caspar Spreizer den notwendigen Eintrittswinkel verhinderte.

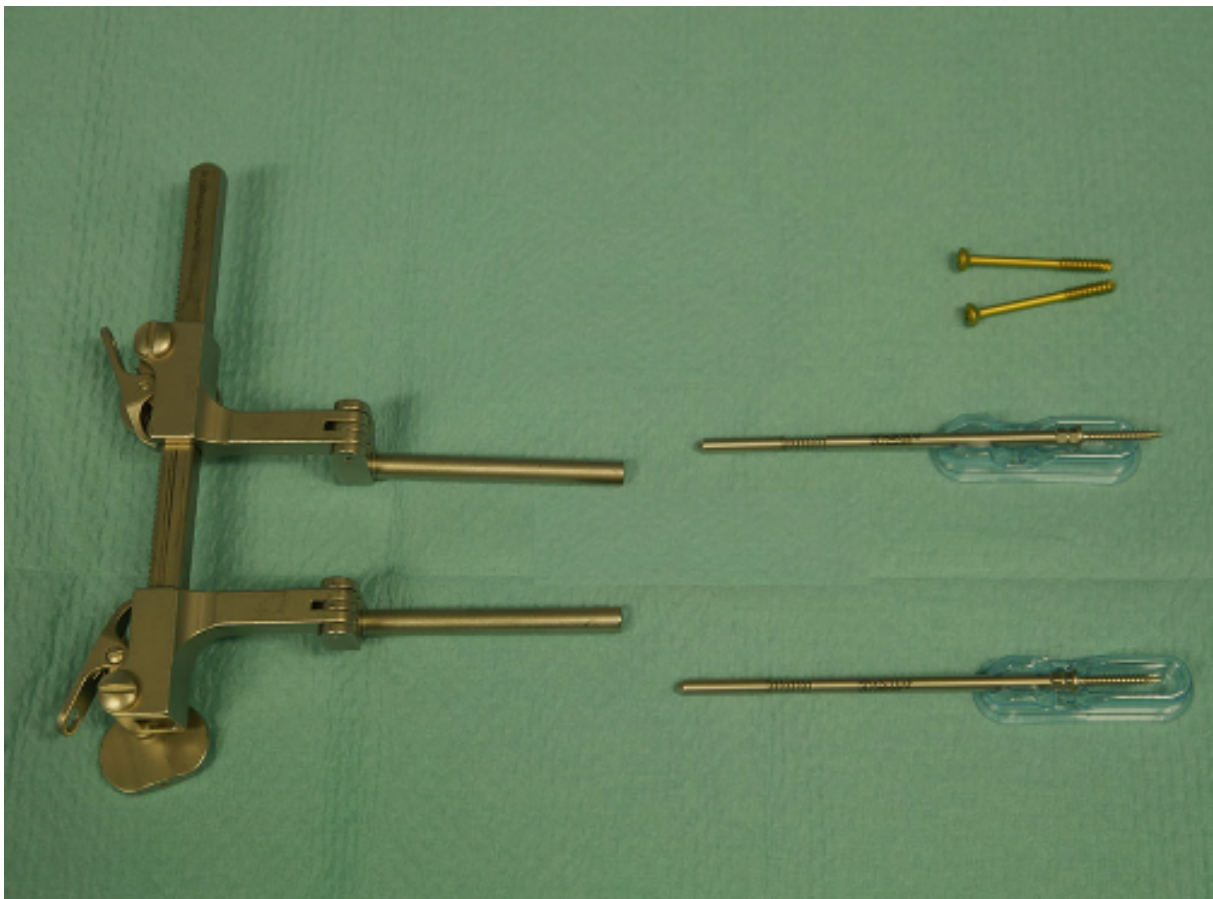


Abbildung 14: Caspar Spreizer (links) mit 2 Schanz-Schrauben (unten rechts) und 2 DensAccess Schrauben (oben rechts).

3.5 Anatomische Messung der Wirbelkörper

3.5.1 Messung der Pedikelwinkel

Zur Messung der Pedikelwinkel wurden die CT-Rohdaten in IMPAX EE implementiert und anschließend dreidimensional rekonstruiert. Dabei musste der zu messende Wirbelkörper, axial und sagittal, zentral eingestellt werden. Anschließend wurde eine Gerade durch den Processus spinosus gelegt. Der Winkel wurde nun anhand der Geraden, ausgehend von der Vorderkante des Wirbelkörpers zentral durch den rechten und linken Pedikel, gemessen.

Die Messmethode entspricht den gängigen Methoden in der Literatur

49,50

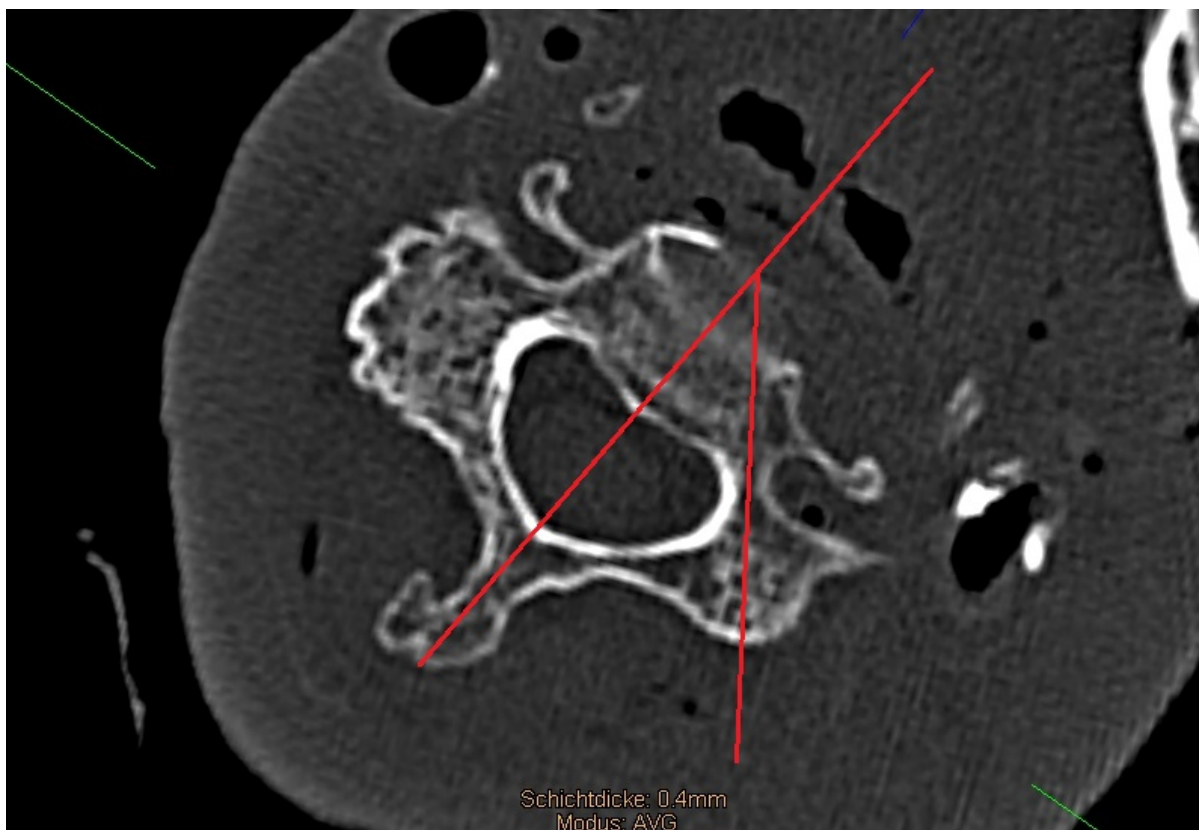


Abbildung 15: Zentral eingestellter subaxialer Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch eingezeichneter Geraden durch den Prozessus spinosus und dazu angelegt den Winkel durch den linken Pedikel.

3.5.2 Messung der Maximalen Schraubenlänge

Zur Messung der Pedikelwinkel wurden die CT-Rohdaten in IMPAX EE implementiert und anschließend dreidimensional rekonstruiert. Dabei musste der zu messende Wirbelkörper axial und sagittal entlang des zu messenden Pedikels eingestellt werden.

Die Messlinie verläuft zentral durch den Pedikel und es wird die maximale Distanz von Wirbelkörpervorderkante bis an die Massa lateralis gemessen. Die Messmethode entspricht den gängigen Methoden in der Literatur ^{49,50}.



Abbildung 16: Zentral entlang des Pedikels eingestellter Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch rot eingezeichneter Strecke der maximal möglichen Schraubenlänge im linken Pedikel. Die Messmethode entspricht der gängigen Methoden in der Literatur ^{49,50}.

3.5.3 Messung der Pedikelweite

Zur Messung der Pedikelweiten wurden die CT-Rohdaten in IMPAX EE implementiert und anschließend dreidimensional rekonstruiert. Dabei musste der zu messende Wirbelkörper axial und sagittal entlang des zu messenden Pedikels eingestellt werden.

Die Messlinie verläuft zentral im Pedikel vom Foramen transversum bis auf die Gegenseite und schließt die Corticalis mit ein.



Abbildung 17: Zentral entlang des Pedikels eingestellter Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch gelb eingezeichneter Strecke der maximalen Pedikelweite. Die Messmethode entspricht der gängigen Methoden Literatur^{49,50}.

3.5 Radiologische Auswertung der Schraubenlage

Nach erfolgter Schraubenimplantation wurde ein multiplanares CT der Präparate in der Radiologie der Uniklinik Köln durchgeführt.

Die Auswertung der Bildgebung erfolgte im Bildprogramm IMPAX EE von Agfa.

Zur Klassifikation der Schraubenlage wurde eine modifizierte Gertzbein und Robins Klassifikation für die Halswirbelsäule verwendet⁵¹.

Grad der Schraubenlage	Radiologische Grundlage
Grad 1	Pedikelwandperforation <1 mm
Grad 2	Pedikelwandperforation <2 mm
Grad 3	Pedikelwandperforation <3 mm
Grad 4	Pedikelwandperforation <4 mm
Grad 5	Pedikelwandperforation > 4 mm und / oder eine Verstopfung des Foramen transversum um mehr als einen halben Schraubendurchmesser

Tabelle 4: Schraubenlage von Pedikelschrauben in Halswirbelkörpern.

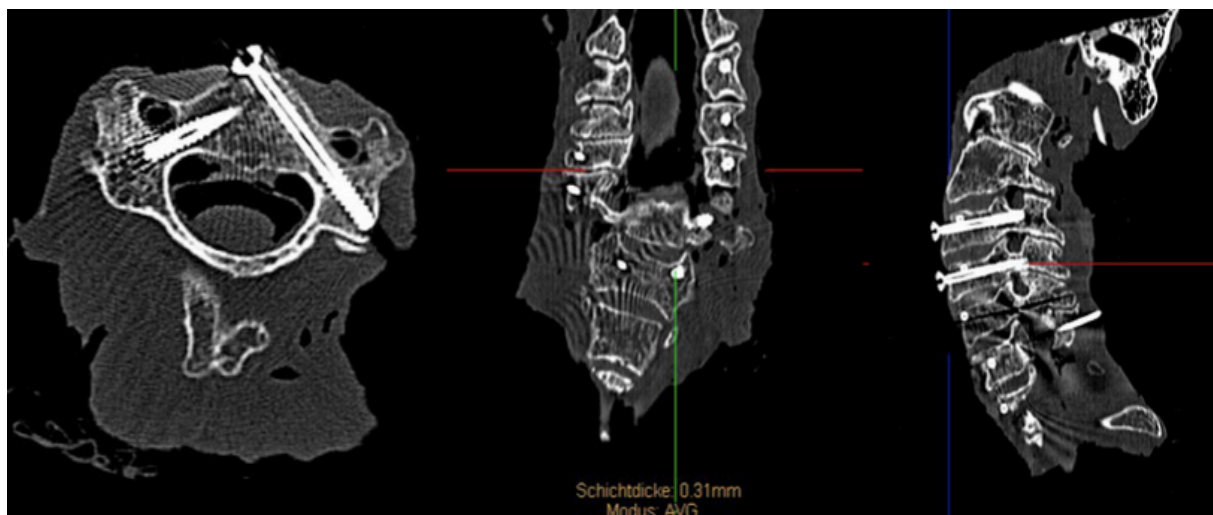


Abbildung 18: Darstellung des multiplanaren CTs in IMPAX EE mit in der axialen Schicht links im Bild (vollständig abgebildete Schraube) einer Grad 1 Schraubenlage nach Gertzbein und Robins (modifiziert) ⁴⁷.

3.6 Statistische Auswertung

Die Bearbeitung der Daten erfolgte mit Microsoft Excel und IBM SPSS.

4. Ergebnisse

4.1. Pedikelweite

Die Pedikelweite wurde nach dreidimensionaler Rekonstruktion im IMPAX EE zentral im Pedikel vom Foramen transversum bis auf die Gegenseite gemessen und schließt die Corticalis mit ein. Dabei zeigte sich im Bereich des HWK 3 die geringste Pedikelweite mit einem Durchschnitt von 4,9 Millimetern. Die Pedikelweite nahm dann von HWK 4 mit im Durchschnitt 5,1 Millimetern bis zu HWK 5 mit im Durchschnitt 5,6 Millimetern zu. Bei HWK 6 nahm die Pedikelweite dann zunächst auf 5,2 Millimeter ab, um dann bei HWK 7 die größte Pedikelweite mit im Durchschnitt 6,8 Millimetern zu erreichen.

Zur graphischen Darstellung wurden die Werte in SPSS übertragen und mittels Boxplot dargestellt.

Wirbelkörper	Durchschnitt der Pedikelweite [Millimeter]	Standardabweichung
HWK 3	4,9	0,4
HWK 4	5,1	0,5
HWK 5	5,6	0,7
HWK 6	5,2	0,7
HWK 7	6,8	0,7

Tabelle 5: Ergebnisse Pedikelweite

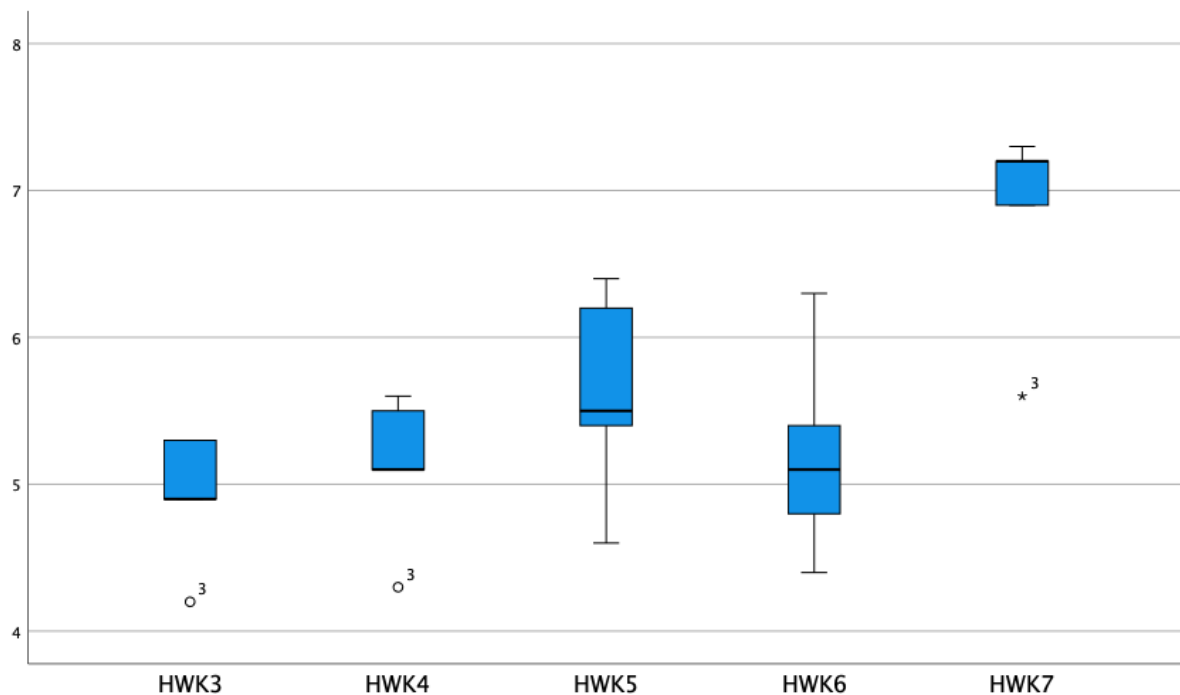


Abbildung 19: Boxplot der Pedikelweite nach Wirbelkörper sortiert

4.2. Maximale mögliche Schraubenlänge

Zur Bestimmung der maximalen möglichen Schraubenlänge wurde in IMPAX EE der Pedikel dreidimensional rekonstruiert und die Distanz zwischen anteriorer Corticalis, transpedikulär bis an die dorsale Corticalis gemessen.

Die von uns gemessene Schraubenlänge nahm im Schnitt von 33,4 Millimetern beim Halswirbelkörper 3 bis zum Halswirbelkörper 5 mit 38,7 Millimetern zu.

Bei den Halswirbelkörpern 6 nahm die maximale Schraubenlänge erneut ab mit einem Durchschnitt von 37,5 Millimetern bevor sie bei den Halswirbelkörpern 7 einen zweiten Höchstwert mit 38,6 erreichten. Die Ergebnisse wurden von Excel in SPSS übertragen und mittels Boxplot graphisch dargestellt.

Wirbelkörper	Durchschnitt der Schraubenlänge [Millimeter]	Standardabweichung
HWK 3	33,4	5,5
HWK 4	36,4	5,1
HWK 5	38,7	6,1
HWK 6	37,5	5,6
HWK 7	38,6	5,1

Tabelle 6: Ergebnisse Schraubenlänge

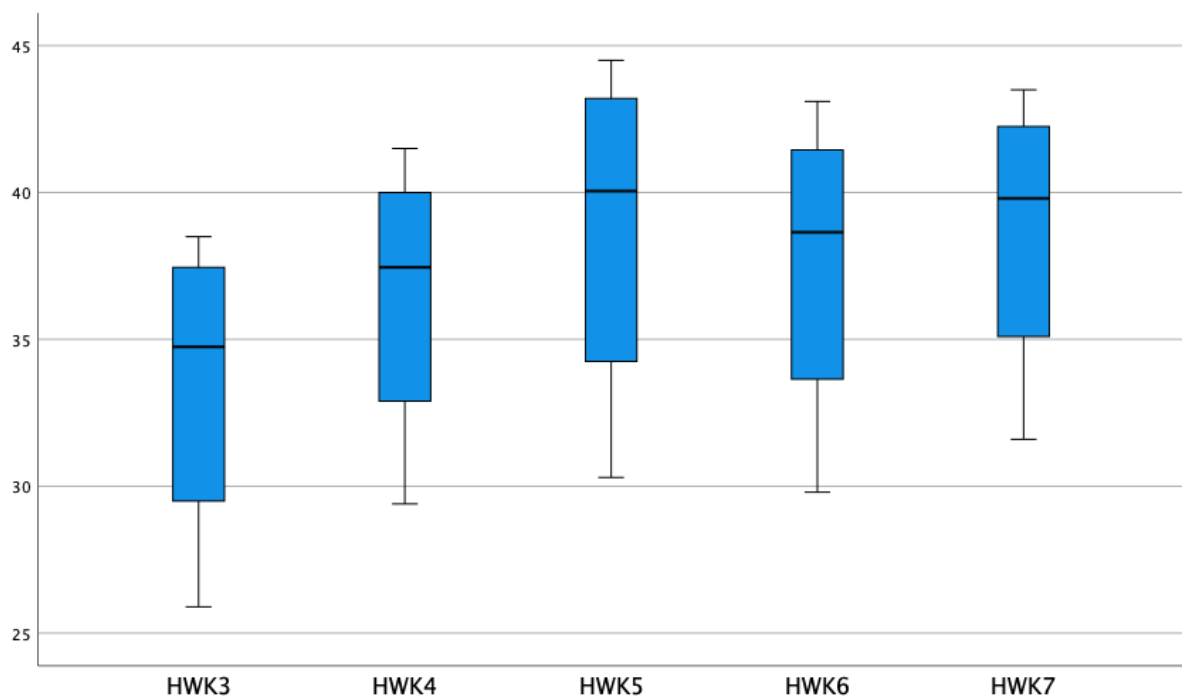


Abbildung 20: Boxplot der maximalen Schraubenlängen nach Halswirbelkörper sortiert.

4.3. Pedikelwinkel in Grad

Die Pedikelwinkel wurden nach dreidimensionaler Rekonstruktion in IMPAX EE gemessen. Dabei wurde eine Gerade durch den Processus spinosus gelegt. Der Winkel wurde nun

anhand der Gerade, ausgehend von der Vorderkante des Wirbelkörpers zentral durch den rechten und linken Pedikel, gemessen.

Die Messmethode entspricht den gängigen Methoden in der Literatur

49,50.

Der Pedikelwinkel bei HWK 3 war im Durchschnitt bei 47,1 Grad. Bei HWK 4 zeigte sich mit im Durchschnitt 50,3 Grad der steilste Winkel. Bei HWK 5 wurde im Durchschnitt 47,8 Grad gemessen. Bei HWK 6 zeigte sich ein etwas geringerer Winkel mit 46,7 Grad und schließlich bei HWK 7 der geringste Winkel mit 43,5 Grad.

Wirbelkörper	Durchschnitt der Pedikelwinkel [Grad]	Standardabweichung
HWK 3	47,1	5,6
HWK 4	50,3	4,1
HWK 5	47,8	5,8
HWK 6	46,7	8,6
HWK 7	43,5	3,8

Tabelle 7: Pedikelwinkel

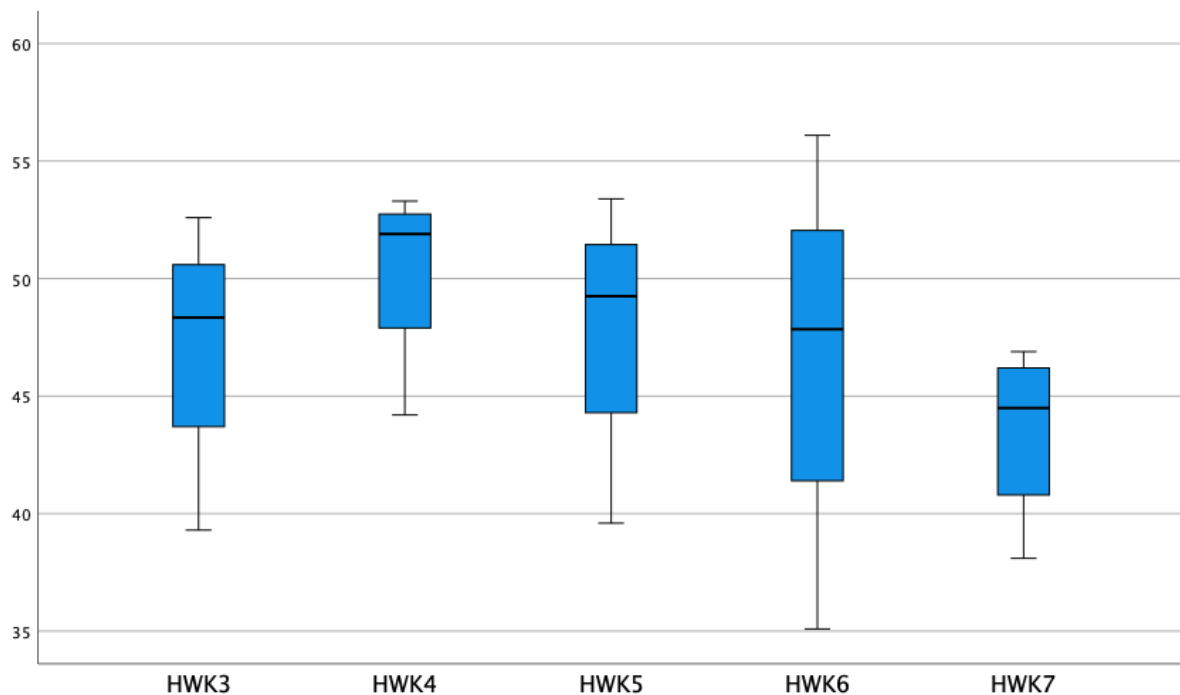


Abbildung 21: Boxplot von Pedikelwinkeln der einzelnen Halswirbelkörper.

4.4. Schraubenlage [Modifiziert n. Gertzbein und Robins]

Zur Klassifikation der Schraubenlage wurde eine modifizierte Gertzbein und Robins Klassifikation für die Halswirbelsäule verwendet ⁵¹.

Die Pedikel mit implantierter Schraube wurden einzeln dreidimensional rekonstruiert und die Schraubenlage in Excel dokumentiert. Anschließend erfolgte eine graphische Darstellung mit einem Säulendiagramm in SPSS.

In die HWK 3 wurden insgesamt sieben Schrauben implantiert. Bei einem Pedikel war dies aufgrund des Versuchsaufbaus nicht möglich. Bei den linken Pedikeln waren drei von drei Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage und bei den rechten Pedikeln waren vier von vier Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage. Es lagen keine Grad 3 – 5 Schraubenlagen vor.

Bei HWK 4 wurden insgesamt fünf Schrauben implantiert. Bei drei Pedikeln war eine Schraubenimplantation aufgrund des Versuchsaufbaus nicht möglich.

Bei den linken Pedikeln waren zwei von zwei Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage. Bei den rechten Pedikeln waren drei von drei eine Grad 1 – 2 Lage. Es lagen keine Grad 3 – 5 Schraubenlagen vor.

Bei HWK 5 wurden acht Schrauben implantiert. Bei den linken Pedikeln waren 4 von 4 Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage. Es lagen keine Grad 3 – 5 Lage vor. Bei den rechten Pedikeln waren drei von vier Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage, eine Schraube war eine Grad 3 - 5 Lage.

Bei HWK 6 wurden insgesamt 8 Schrauben implantiert. Bei den linken Pedikeln waren vier von vier Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage. Es lagen keine Grad 3 – 5 Schraubenlagen vor. Bei den

rechten Pedikeln waren zwei von vier Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage. Bei weiteren zwei von vier lag eine Grad 3 – 5 Schraubenlage vor.

Bei HWK 7 wurden insgesamt 8 Schrauben implantiert. Bei den linken Pedikeln wurde bei vier von vier Schrauben eine Grad 1 – 2 Lage erreicht. Es lagen links keine Grad 3 – 5 Schraubenlage vor. Bei den rechten Pedikeln wurde bei zwei von vier eine Grad 1 – 2 Lage erreicht. Bei den weiteren 2 Pedikeln wurde lediglich eine Grad 3 -5 Lage erreicht.

Von insgesamt 36 Schrauben wurden bei 31 eine Grad 1 – 2 Lage erreicht. Bei den verbleibenden 5 wurde lediglich eine Grad 3 – 5 Lage erreicht.

Somit wurde insgesamt bei 86,1% eine Grad 1 – 2 Lage erreicht und bei 13,9% eine Grad 3 – 5 Lage.

Nach Körperseiten unterteilt wurde auf der linken Seite zu 100% eine Grad 1 – 2 Lage erreicht und auf der rechten Körperseite zu 73% eine Grad 1 – 2 Lage und zu 27% eine Grad 3 – 5 Lage.

Wirbelkörper	Anzahl	Grad 1-2 (links)	Grad 1-2 (rechts)	Grad 3-5 (links)	Grad 3-5 (rechts)
HWK 3	7	3	4	0	0
HWK 4	5	2	3	0	0
HWK 5	8	4	3	0	1
HWK 6	8	4	2	0	2
HWK 7	8	4	2	0	2

Tabelle 8: Schraubenlage

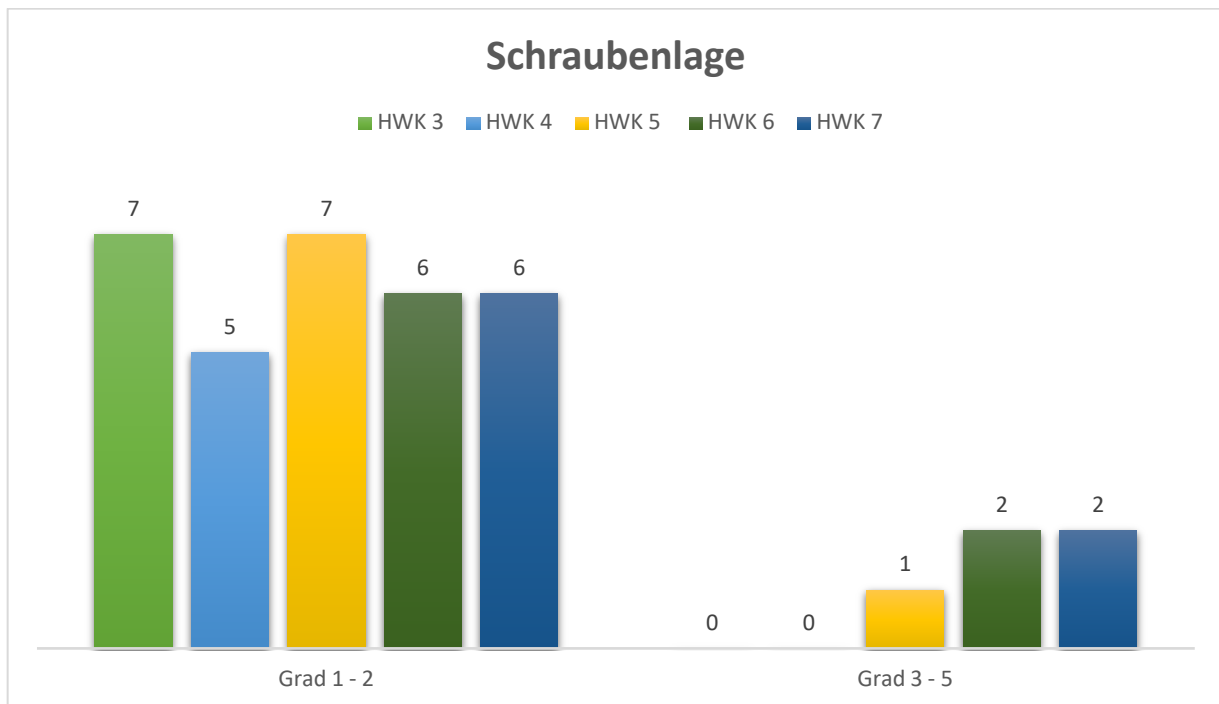


Abbildung 22: Schraubenlage nach Halswirbelkörper sortiert und nach guter beziehungsweise akzeptabler und schlechter Schraubenlage gruppiert.

5. Diskussion

Die ventrale operative Versorgung von Pathologien an der Halswirbelsäule ist ein seit Jahren etabliertes Standardverfahren ^{3,7,8,38,46,52}.

Insbesondere bei traumatischen Verletzungen der HWS muss aber häufig die Stabilität mit einer dorsalen Spondylodese wieder hergestellt werden ^{2,3,53}.

Dies bedeutet für Patienten gegebenenfalls mehrere operative Eingriffe mit entsprechend erhöhten perioperativen Risiken und längerer Verweildauer im Krankenhaus ^{5,8}.

In der vorliegenden Arbeit sollten anatomische Besonderheiten der Pedikel der subaxialen Halswirbelsäule erforscht werden, sowie die Möglichkeit einer navigierten anterioren Pedikelschraube

5.1 Anatomie der Pedikel, Nervenwurzeln und A. vertebralis

Die gemessenen Pedikelbreiten waren im Durchschnitt bei dem dritten Halswirbelkörper am kleinsten mit 4,9 Millimeter und nahmen dann bis zum siebten Halswirbelkörper auf durchschnittlich 6,8 Millimeter zu.

Diese Werte sind mit denen in der Literatur beschriebenen Werte, trotz unserer kleinen Gruppe, vergleichbar ^{49,50,54}. Jones et al. haben auf der Höhe von HWK 3 eine durchschnittliche Pedikelweite von 4,8 Millimetern gemessen und ebenfalls zunehmende Werte gemessen, bis schließlich bei HWK 7 mit durchschnittlich 6,9 Millimetern Breite.

Die geringste Breite der Pedikel ist in der Literatur bei C3 und C4 beschrieben ⁵⁵.

Das ist insbesondere interessant, da Fehllagen von Pedikelschrauben in den Segmenten von C3 und C4 signifikant häufiger sind als in den breiteren Pedikeln von C6 und C7 ⁵⁶

Hirano et al. konnten zeigen, dass der Pedikel circa 80% der kraniokaudalen und 60% der „pull-out“ Stabilität ausmacht ⁵⁷. Somit kommt der Anatomie und der Größe der Pedikel eine besondere Bedeutung zu.

Brantley et al. zeigten, dass eine Schraube, die den Pedikel um mehr als 70% ausfüllt, signifikant mehr Stabilität aufweist ⁵⁸.

Daher ist es aus unserer Sicht sinnvoll, sich mit den Breiten von Pedikeln auseinanderzusetzen und entsprechend große anteriore Schrauben zu implantieren, um eine größtmögliche Stabilität zu erreichen.

Die von uns gemessenen Pedikelwinkel waren im Mittel 47,8° und wichen auf den unterschiedlichen Höhen nicht signifikant voneinander ab. In der Literatur beschriebene Werte variieren je nach Messmethode ^{49,54}. Dabei ist es aus unserer Sicht wichtig, die anatomischen Verhältnisse und den Eintrittswinkel zur Schraubenplatzierung zu kennen, da aber heute cervicale Schrauben immer navigiert implantiert werden sollten, kommt dem Winkel aus diesem Aspekt gesehen eher eine untergeordnete Bedeutung zu ³.

Wichtiger und problematisch erscheint der Pedikelwinkel insofern, als dass sich aufgrund der aufeinander zulaufenden Pedikel von anterior Schrauben überschneiden werden. Das erschwert eine Fixierung in einer Platte oder macht es sogar unmöglich.

Dabei kann beim dorsalen Ansatz der weiter auseinanderliegende Eintrittspunkt der Schrauben ein klarer Vorteil sein.

Die maximal implantierbare Schraubenlänge reichte von 27,9 Millimetern im Halswirbel 3 bis zu 43,7 Millimetern im Halswirbel 7. Auch im Mittel nahmen die Werte vom Halswirbel 3 bis zum Halswirbel 7 zu.

Ausführlich biomechanisch erforscht ist die Schraubenlänge bei Pedikelschrauben⁵⁸⁻⁶⁰. Dabei konnten alle Arbeiten zeigen, dass eine Ausnutzung der maximalen möglichen Schraubenlänge eine signifikante Verbesserung der Stabilität erzielt.

Die maximalen Schraubenlänge variiert von C3 bis C7 stark, sodass unterschiedlich lange Schrauben implantiert werden müssen und dementsprechend verfügbar sein müssen. Anhand der 3D Navigation wäre dies einfach umsetzbar und planbar.

Neben der Stabilität, die durch eine Pedikelschraube erreicht werden kann, birgt die Pedikelschraube besondere Risiken im Bereich der cervicalen Wirbelsäule⁵⁶.

Angrenzende Strukturen wie die A. vertebralis, das Rückenmark sowie die austretenden Nervenwurzeln können verletzt werden⁶¹.

Insgesamt sind Verletzungen der A. vertebralis selten, aber relevant und werden mit 0,6% pro Patient oder 0,15% pro Schraube angegeben^{55,62}.

Insgesamt ist hier die Zahl der Publikationen gering und Verletzungen der A. vertebralis werden nur als bemerkte Verletzungen gewertet⁶².

Schraubenfehlagen nach denen das Foramen transversum verlegt ist, werden hier nicht als Verletzung der A. vertebralis interpretiert, obwohl eine Kompression zumindest möglich ist. Dabei werden hier in der Literatur bis zu 17,2% an Obstruktionen durch Schraubenfehlagen beschrieben⁶³.

Eine weitere mögliche Ursache, dass die A. vertebralis trotz Verlegung eines Großteils des Foramen transversum nicht verletzt wird, ist die stark variierende Ausdehnung der A. vertebralis im Foramen, die zwischen 8% und 85% angegeben wird⁶⁴.

Verletzungen der Nervenwurzeln werden mit 0,31% pro Schraube und 1,24% pro Patient angegeben⁶².

5.2 Navigierte Schraubenimplantation

Die Schraubenlage bei Pedikelschrauben ist im Hinblick auf Stabilität sowie perioperative Komplikationen von besonderer Bedeutung^{57,65,66}.

Dabei stehen verschiedene Techniken zur Verschraubung der Pedikel zu Verfügung^{35,36,62,67-}

Bei der konventionellen Technik, bei der die Schraubenpositionierung in einem seitlichen Röntgenbild mit einem Bildwandler kontrolliert werden, sind zwischen 5% und 40% Fehlplatzierungen von Schrauben beschrieben^{55,70,72}.

Durch die verbesserte Schraubenlage bei navigiert eingebrachten Pedikelschrauben ist diese Technik heute im Bereich der cervicalen Wirbelsäule als Standard etabliert und zum Beispiel in der deutschen Leitlinie zu subaxialen Halswirbelsäulenverletzungen empfohlen³.

Vorteile der Navigation sind somit weniger intraoperative Komplikationen, sowie postoperative Revisionen, als auch eine geringere Strahlenbelastung für das operative Team. Mögliche Nachteile sind sowohl eine potentiell längere OP-Dauer, als auch eine höhere Strahlenbelastung für den Patienten.

5.3 Schraubenlage

Um Schraubenfehlagen zu messen, bedarf es einer geeigneten Messmethode mit genauen Grenzen, was eine gute und was eine schlechte Schraubenlage definiert.

Kosmopoulos et al. stellten in ihrer Arbeit fest, dass die Platzierungsgenauigkeit stark von der Messmethode abhängt. Dabei haben Sie insgesamt 35 verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der Schraubenlage in der aktuellen Literatur finden können. Nachdem in ihrer Arbeit alle Studien ausgeschlossen wurden, die eine genaue Definition einer Schraubenfehlage nicht angegeben haben, nahm die Genauigkeit der Schraubenlage im Vergleich zu dem Gesamtergebnis um 4,6%, auf 86,7% ab⁶⁹.

Problematisch bei der Bestimmung von Schraubenfehlagen sind die Form von Pedikel und Schraube. Die Herausforderung ist, etwaige Ungenauigkeiten, wie zum Beispiel, die Messung neben der maximalen Perforation, zu minimieren.

Eine geeignete Messmethode an der Lenden- und Brustwirbelsäule wurde von Gertzbein et al. entwickelt und im Vorfeld unserer Arbeit von Bredow et al. an der Halswirbelsäule modifiziert angewendet^{51,72}. Dabei konnte eine sehr gute intra- und interobserver reliability gezeigt werden.

Aus Vorstudien und aus eigener Erfahrung schlossen Bredow et al., dass Schraubenpositionen, die den Pedikel maximal einen Millimeter perforieren, als sichere oder exzellente Schrauben gewertet werden müssen. Bei Schrauben, die den Pedikel maximal 2 Millimeter perforieren, wurden keine Symptome einer Schraubenfehlage (Reizungen der Nervenwurzel, Schmerzen, neurologische Ausfälle, Schlaganfall) beobachtet, sodass hier von einer guten, ausreichenden Schraubenlage ausgegangen werden muss. Alle Schrauben, die über zwei Millimeter den Pedikel perforieren, sind als nicht gute Schraubenlage anzusehen, werden dabei aber noch in die Grade 3 (suboptimal) bis 5 (schlecht), je nach Ausmaß der Schraubenfehlage, unterteilt.

Zusammenfassend wird somit eine Schraubenlage mit einer Perforation von unter 2 Millimetern als gute Schraubenlage definiert und Perforationen der Pedikel von mehr als 2 Millimetern als schlechte Schraubenlage ^{47,48,51}.

Unter Anwendung der genannten Klassifizierung bei den von uns platzierten anterioren Pedikelschrauben wurde von uns in 86,1% der Fälle eine gute und in 13,9% eine schlechte Schraubenlage erreicht ⁴⁷.

Vergleichbare Werte werden bei dorsalen Verschraubungen erreicht ⁶⁹.

In einem vorangegangenen Versuch haben Bredow et al. die anteriore Pedikelschraube mit der gleichen Technik in Wirbelkörper aus Kunstknochen eingebracht. Dabei wurden in 95% der Fälle eine gute Schraubenplatzierung erreicht und lediglich in 5% eine schlechte Schraubenlage, wobei in der Unterklassifikation die 5% in der Kategorie 3, also suboptimal, lagen ⁴⁸.

Variablen, die die Schraubenlage beeinflussen, sind zum einen der Pedikel selbst, wobei die Pedikel von C3 und C4 die kleinsten sind, und damit in den Pedikeln auch häufiger eine schlechtere Schraubenlage beschrieben ist ^{56,68}. Bei den von uns platzierten Schrauben waren alle in den Halswirbelkörpern 3 und 4 mit guter Schraubenlage. Als Einschränkung und Ergänzung konnten ebenfalls in die Wirbelkörper 3 und 4 insgesamt 4 Schrauben aufgrund des Versuchsaufbaus nicht eingebracht werden. Bei dem Versuchsaufbau ist die Referenz am Caspar-Spreizer fixiert und darf nach erfolgtem CT nicht berührt werden, da sonst eine exakte Navigation nicht mehr gewährleistet werden kann. Bei 4 Pedikelschrauben hätte beim Einbringen des K-Drahtes die Referenz der Navigation berührt werden müssen und somit konnten sie nicht eingebracht werden.

Intraoperativ verbleibt hier die Möglichkeit, eine erneute CT Navigation durchzuführen, bei insgesamt erhöhter Strahlenbelastung für den Patienten. In unserem Versuchsaufbau haben wir uns dagegen entschieden, um eine verlässliche Vergleichbarkeit bei identischem Versuchsaufbau zu erhalten.

Eine weitere Variable ist die CT Navigation. Bei der Navigation werden Punkte im Situs bestätigt. Dazu werden um die Referenz zwanzig Punkte, die anatomisch makroskopisch erkennbar sind, mit dem Navigationsmonitor verglichen und durch den Operateur bestätigt. Aus diesem Umstand ergeben sich Ungenauigkeiten, je größer die Distanz zu der eingebrachten Referenz ist. In unserem Versuchsaufbau war die Referenz in dem Wirbelkörper C6 fixiert, sodass von einer größeren Ungenauigkeit insbesondere bei C4 und noch größer bei C3 ausgegangen werden muss. Trotzdem konnte hier eine sehr gute Schraubenlage erreicht werden.

5.4 Navigierte anteriore Pedikelschrauben

Die Entwicklung zur Idee einer anterioren Pedikelschraube entstand in einer Arbeitsgruppe von Koller et al.⁴⁰.

Bedingt durch die erhöhte Morbidität und Komplikationsraten von dorsoventralen Eingriffen und die geringe biomechanische Stabilität von anterioren Platten, insbesondere bei langstreckigeren Versorgungen, wurde in dieser Arbeitsgruppe eine anatomische Machbarkeitsstudie durchgeführt⁴⁰. Dabei kamen Koller et al. zu dem Schluss, dass in der subaxialen Halswirbelsäule anteriore Pedikelschrauben implantierbar seien. In weiteren Studien wurde die biomechanische Stabilität des anterioren Konstrukts getestet und mit dorsalen Verschraubungen verglichen⁴¹. Mit einer Bildwandler gestützten Methode wurden die Schrauben nicht-navigiert eingebracht und es wurde in 21,7% eine schlechte Schraubenlage festgestellt. Weiterhin erfolgte eine Testung der „pull-out-strength“, die mit dorsal eingebrachten Schrauben verglichen wurde. Hier zeigte sich eine signifikant höhere Stabilität der anterioren Pedikelschrauben⁴¹. Erwähnt werden muss hier, dass Koller et al. einen längs gerichteten Pull-out Versuchsaufbau gewählt haben. In aktuellen Studien konnte gezeigt werden, dass sich der axiale Zug an einer Schraube einen Grad der Stabilität bestimmen lässt, dass aber eine an Realität herankommende Stabilitätstestung in einer kraniokaudalen Belastung erfolgen sollte⁷⁴.

In den folgenden Jahren wurden Implantationstechniken, sowie biomechanische Eigenschaften der ATPS weiter erforscht und beschrieben⁴²⁻⁴⁴.

Als wichtigen weiteren Schritt in der Entwicklung der anterioren Pedikelschraube konnten Patton et al. zeigen, dass navigierte ATPS eine bessere Schraubenlage im Vergleich zu konventionell eingebrachten aufweisen⁴⁵.

Nachdem die Technik etabliert und sich als durchführbar herausgestellt hat, konnten wir in unserem Versuchsaufbau eine Methode entwickeln, mit der diese Schrauben praktisch und wirtschaftlich implantiert werden können.

Als Ergänzung zu unserer Navigation muss einmalig der Adapter erworben werden, um die Referenz an der Schanzschraube zu fixieren. Vergleichbare Navigationssysteme sind in Wirbelsäulenzentren vorhanden und bei allen ventralen Zugängen werden Schanzschrauben benutzt. Somit ergibt sich hier eine einfache und wirtschaftliche Lösung.

Bei dorsalen Versuchsaufbauten wird die Referenzklemme an einem Prozessus spinosus fixiert, beziehungsweise geklemmt. Aufgrund des kleinen Zugangs bei ventralen Operationen würde dies entweder ein zusätzlich verkleinertes Op-Gebiet für den Operateur bedeuten, oder der Hautschnitt müsste erweitert werden.

Daher ist die Fixierung an der notwendigen Schanzschraube eine einfache und machbare Lösung des Problems.

Die Genauigkeit einer Navigation hängt in großem Ausmaß von der Fixierung der Referenz ab. Wenn die Referenz bewegt werden kann, ändern sich somit alle Punkte in der Navigation und macht diese unbrauchbar.

Durch die Stabilität der Schanzschraube im Wirbelkörper ergibt sich bei unserem Versuchsaufbau eine hohe Genauigkeit und ein geringes Risiko von Fehlinterpretationen der Navigation, was sich in der guten Schraubenlage von 86,1% deutlich widerspiegelt ⁴⁷. Als Nachteil sehen wir den durch die Referenz begrenzten OP-Bereich an, der in unserem Versuchsaufbau dazu geführt hat, dass 4 Schrauben nicht platziert werden konnten. In einer Operation würde dies für den Patienten ein Umsetzen der Referenz sowie eine erneute Referenzierung im Op-Gebiet bedeuten und damit eine verlängerte OP-Zeit.

Insgesamt ist das ATPS ein Verfahren, das bei einer ausgewählten Patientengruppe eine gute Alternative zu den bisherigen zweizeitigen Verfahren bietet.

Dabei muss vorher ein Dünnschicht CT angefertigt werden, um potentielle Gefahren, wie ein mögliches Überschneiden von anterioren Pedikelschrauben, auszuschließen.

Insbesondere bei Patienten, bei denen ein hohes kardiovaskuläres Risiko im Rahmen einer Narkose besteht, bietet die einzeitige Stabilisierung der subaxialen Halswirbelsäule einen wesentlichen Vorteil.

Weitere Vorteile bieten die geringen Komplikationen bei Blutverlust und Wundinfektionen.

Um die ATPS zu einem sicheren und anwendbaren Verfahren zu etablieren, sollten weitere Studien an Patienten im Hinblick auf Schraubenlage und Komplikationen durchgeführt werden. In unserer Studie haben wir mit der neuen Methode bereits gute und mit dorsalen Verfahren vergleichbare Schraubenlagen erzielen können.

Mit weiterer Erfahrung und Weiterentwicklung des Verfahrens könnten in Zukunft bessere Schraubenlagen erreicht werden, sodass die ATPS bei bestimmten Indikationen der dorsalen Stabilisierung überlegen sein könnte.

6. Literatur

1. Lowery DW, Wald MM, Browne BJ, et al. Epidemiology of cervical spine injury victims. *Ann Emerg Med* 2001; 38(1): 12-6.
2. Vaccaro AR, Koerner JD, Radcliff KE, et al. AOSpine subaxial cervical spine injury classification system. *European Spine Journal* 2016; 25(7): 2173-84.
3. Schleicher P, Scholz M, Kandziora F, et al. [Subaxial Cervical Spine Injuries: Treatment Recommendations of the German Orthopedic and Trauma Society]. *Z Orthop Unfall* 2017; 155(5): 556-66.
4. Barnes AH, Eguizabal JA, Acosta FL, Jr., Lotz JC, Buckley JM, Ames CP. Biomechanical pullout strength and stability of the cervical artificial pedicle screw. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009; 34(1): E16-20.
5. Memtsoudis SG, Hughes A, Ma Y, Chiu YL, Sama AA, Girardi FP. Increased in-hospital complications after primary posterior versus primary anterior cervical fusion. *Clin Orthop Relat Res* 2011; 469(3): 649-57.
6. Harel R, Hwang R, Fakhar M, et al. Circumferential cervical surgery: to stage or not to stage? *J Spinal Disord Tech* 2013; 26(4): 183-8.
7. Epstein NE. A Review of Complication Rates for Anterior Cervical Discectomy and Fusion (ACDF). *Surg Neurol Int* 2019; 10: 100.
8. Yee TJ, Swong K, Park P. Complications of anterior cervical spine surgery: a systematic review of the literature. *J Spine Surg* 2020; 6(1): 302-22.
9. Bogduk N. Functional anatomy of the spine. Elsevier; 2016: 675-88.
10. Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clinical Biomechanics* 2000; 15(9): 633-48.
11. Diebo BG, Varghese JJ, Lafage R, Schwab FJ, Lafage V. Sagittal alignment of the spine: What do you need to know? *Clin Neurol Neurosurg* 2015; 139: 295-301.
12. Schünke M SE, Schumacher U, Voll M, Wesker Kh. Prometheus Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie. 2014; Thieme Georg Verlag; 4. Auflage.
13. Sherman JL, Nassaux PY, Citrin CM. Measurements of the normal cervical spinal cord on MR imaging. *AJNR Am J Neuroradiol* 1990; 11(2): 369-72.
14. Stanley JH, Schabel SI, Frey GD, Hungerford GD. Quantitative analysis of the cervical spinal canal by computed tomography. *Neuroradiology* 1986; 28(2): 139-43.
15. Yu YL, du Boulay GH, Stevens JM, Kendall BE. Morphology and measurements of the cervical spinal cord in computer-assisted myelography. *Neuroradiology* 1985; 27(5): 399-402.
16. Panjabi MM, Oxland TR, Parks EH. Quantitative anatomy of cervical spine ligaments. Part II. Middle and lower cervical spine. *J Spinal Disord* 1991; 4(3): 277-85.

17. Nakagawa H, Mikawa Y, Watanabe R. Elastin in the human posterior longitudinal ligament and spinal dura. A histologic and biochemical study. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; 19(19): 2164-9.
18. Hayashi K, Yabuki T, Kurokawa T, Seki H, Hogaki M, Minoura S. The anterior and the posterior longitudinal ligaments of the lower cervical spine. *J Anat* 1977; 124(Pt 3): 633-6.
19. Ivancic PC, Coe MP, Ndu AB, et al. Dynamic mechanical properties of intact human cervical spine ligaments. *Spine J* 2007; 7(6): 659-65.
20. Johnson RM, Crelin ES, White AA, 3rd, Panjabi MM, Southwick WO. Some new observations on the functional anatomy of the lower cervical spine. *Clin Orthop Relat Res* 1975; (111): 192-200.
21. Rahmani MS, Terai H, Akhgar J, et al. Anatomical analysis of human ligamentum flavum in the cervical spine: Special consideration to the attachments, coverage, and lateral extent. *J Orthop Sci* 2017; 22(6): 994-1000.
22. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)* 1983; 8(8): 817-31.
23. Hasler RM, Exadaktylos AK, Bouamra O, et al. Epidemiology and predictors of cervical spine injury in adult major trauma patients: a multicenter cohort study. *J Trauma Acute Care Surg* 2012; 72(4): 975-81.
24. Goldberg W, Mueller C, Panacek E, et al. Distribution and patterns of blunt traumatic cervical spine injury. *Ann Emerg Med* 2001; 38(1): 17-21.
25. Christiansen BA, Bouxsein ML. Biomechanics of vertebral fractures and the vertebral fracture cascade. *Curr Osteoporos Rep* 2010; 8(4): 198-204.
26. Leone A, Marino M, Dell'Atti C, Zecchi V, Magarelli N, Colosimo C. Spinal fractures in patients with ankylosing spondylitis. *Rheumatol Int* 2016; 36(10): 1335-46.
27. Coleman RE. Skeletal complications of malignancy. *Cancer* 1997; 80(8 Suppl): 1588-94.
28. Coleman RE, Smith P, Rubens RD. Clinical course and prognostic factors following bone recurrence from breast cancer. *Br J Cancer* 1998; 77(2): 336-40.
29. Spector LR, Kim DH, Affonso J, Albert TJ, Hilibrand AS, Vaccaro AR. Use of computed tomography to predict failure of nonoperative treatment of unilateral facet fractures of the cervical spine. *Spine* 2006; 31(24): 2827-35.
30. Panjabi MM, White AA, 3rd. Basic biomechanics of the spine. *Neurosurgery* 1980; 7(1): 76-93.
31. Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik) Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern (4-Steller). Statistisches Bundesamt (Destatis) 2018.

32. Kohn D, Pohlemann T, Operationsatlas für die orthopädisch-unfallchirurgische Weiterbildung Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2010.
33. Richter M. Posterior instrumentation of the cervical spine using the neon occipito-cervical system. Part 2: cervical and cervicothoracic instrumentation. *Oper Orthop Traumatol* 2005; 17(6): 579-600.
34. Hong JT, Sung JH, Son BC, Lee SW, Park CK. Significance of laminar screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2008; 33(16): 1739-43.
35. Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques. *Eur Spine J* 2012; 21(2): 247-55.
36. Cong Y, Bao N, Zhao J, Mao G. Comparing Accuracy of Cervical Pedicle Screw Placement between a Guidance System and Manual Manipulation: A Cadaver Study. *Med Sci Monit* 2015; 21: 2672-7.
37. Cloward RB. The anterior approach for removal of ruptured cervical disks. *J Neurosurg* 1958; 15(6): 602-17.
38. Civelek E, Kiris T, Hepgul K, Canbolat A, Ersoy G, Cansever T. Anterolateral approach to the cervical spine: major anatomical structures and landmarks. Technical note. *J Neurosurg Spine* 2007; 7(6): 669-78.
39. Cheung KM, Mak KC, Luk KD. Anterior approach to cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2012; 37(5): E297-302.
40. Koller H, Hempfing A, Acosta F, et al. Cervical anterior transpedicular screw fixation. Part I: Study on morphological feasibility, indications, and technical prerequisites. *Eur Spine J* 2008; 17(4): 523-38.
41. Koller H, Acosta F, Tauber M, et al. Cervical anterior transpedicular screw fixation (ATPS)--Part II. Accuracy of manual insertion and pull-out strength of ATPS. *Eur Spine J* 2008; 17(4): 539-55.
42. Yukawa Y, Kato F, Ito K, Nakashima H, Machino M. Anterior cervical pedicle screw and plate fixation using fluoroscope-assisted pedicle axis view imaging: a preliminary report of a new cervical reconstruction technique. *Eur Spine J* 2009; 18(6): 911-6.
43. Koktekir E, Toktas ZO, Seker A, Akakin A, Konya D, Kilic T. Anterior transpedicular screw fixation of cervical spine: Is it safe? Morphological feasibility, technical properties, and accuracy of manual insertion. *J Neurosurg Spine* 2015; 22(6): 596-604.
44. Wu C, Chen C, Wu W, et al. Biomechanical analysis of differential pull-out strengths of bone screws using cervical anterior transpedicular technique in normal and osteoporotic cervical cadaveric spines. *Spine (Phila Pa 1976)* 2015; 40(1): E1-8.

45. Patton AG, Morris RP, Kuo YF, Lindsey RW. Accuracy of fluoroscopy versus computer-assisted navigation for the placement of anterior cervical pedicle screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 2015; 40(7): E404-10.
46. Buttermann GR. Anterior Cervical Discectomy and Fusion Outcomes over 10 Years: A Prospective Study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2018; 43(3): 207-14.
47. Bredow J, Meyer C, Siedek F, et al. Accuracy of 3D fluoro-navigated anterior transpedicular screws in the subaxial cervical spine: an experimental study on human specimens. *Eur Spine J* 2017; 26(11): 2934-40.
48. Bredow J, Meyer C, Scheyerer MJ, et al. Accuracy of 3D fluoroscopy-navigated anterior transpedicular screw insertion in the cervical spine: an experimental study. *Eur Spine J* 2016; 25(6): 1683-9.
49. Panjabi MM, Duranceau J, Goel V, Oxland T, Takata K. Cervical human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions. *Spine (Phila Pa 1976)* 1991; 16(8): 861-9.
50. Mohi Eldin MM. Cervical pedicle screw fixation: anatomic feasibility of pedicle morphology and radiologic evaluation of the anatomical measurements. *Asian Spine J* 2014; 8(3): 273-80.
51. Bredow J, Beyer F, Oppermann J, et al. A novel classification of screw placement accuracy in the cervical spine. *Technol Health Care* 2016; 24(6): 919-25.
52. Kim LH, D'Souza M, Ho AL, et al. Anterior Techniques in Managing Cervical Disc Disease. *Cureus* 2018; 10(8): e3146.
53. Boockvar JA, Philips MF, Telfeian AE, O'Rourke DM, Marcotte PJ. Results and risk factors for anterior cervicothoracic junction surgery. *J Neurosurg* 2001; 94(1 Suppl): 12-7.
54. Jones EL, Heller JG, Silcox DH, Hutton WC. Cervical pedicle screws versus lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; 22(9): 977-82.
55. Abumi K, Shono Y, Ito M, Taneichi H, Kotani Y, Kaneda K. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000; 25(8): 962-9.
56. Kast E, Mohr K, Richter HP, Borm W. Complications of transpedicular screw fixation in the cervical spine. *Eur Spine J* 2006; 15(3): 327-34.
57. Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE, et al. Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; 22(21): 2504-9; discussion 10.
58. Brantley AG, Mayfield JK, Koeneman JB, Clark KR. The effects of pedicle screw fit. An in vitro study. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; 19(15): 1752-8.
59. Cho W, Cho SK, Wu C. The biomechanics of pedicle screw-based instrumentation. *J Bone Joint Surg Br* 2010; 92(8): 1061-5.

60. Krag MH. Biomechanics of thoracolumbar spinal fixation. A review. *Spine (Phila Pa 1976)* 1991; 16(3 Suppl): S84-99.
61. Inamasu J, Guiot BH. Vascular injury and complication in neurosurgical spine surgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2006; 148(4): 375-87.
62. Yoshihara H, Passias PG, Errico TJ. Screw-related complications in the subaxial cervical spine with the use of lateral mass versus cervical pedicle screws: a systematic review. *J Neurosurg Spine* 2013; 19(5): 614-23.
63. Taneichi H, Suda K, Kajino T, Kaneda K. Traumatically induced vertebral artery occlusion associated with cervical spine injuries: Prospective study using magnetic resonance angiography. *Spine* 2005; 30(17): 1955-62.
64. Sanelli PC, Tong S, Gonzalez RG, Eskey CJ. Normal variation of vertebral artery on CT angiography and its implications for diagnosis of acquired pathology. *J Comput Assist Tomogr* 2002; 26(3): 462-70.
65. Sarzier JS, Evans AJ, Cahill DW. Increased pedicle screw pullout strength with vertebroplasty augmentation in osteoporotic spines. *J Neurosurg* 2002; 96(3 Suppl): 309-12.
66. Li N, He D, Xing Y, Lv Y, Tian W. The effect of lateral wall perforation on screw pull-out strength: a cadaveric study. *J Orthop Surg Res* 2015; 10: 6.
67. Weinstein JN, Spratt KF, Spengler D, Brick C, Reid S. Spinal Pedicle Fixation - Reliability and Validity of Roentgenogram-Based Assessment and Surgical Factors on Successful Screw Placement. *Spine* 1988; 13(9): 1012-8.
68. Richter M, Cakir B, Schmidt R. Cervical pedicle screws: conventional versus computer-assisted placement of cannulated screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005; 30(20): 2280-7.
69. Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; 32(3): E111-20.
70. Hojo Y, Ito M, Suda K, Oda I, Yoshimoto H, Abumi K. A multicenter study on accuracy and complications of freehand placement of cervical pedicle screws under lateral fluoroscopy in different pathological conditions: CT-based evaluation of more than 1,000 screws. *Eur Spine J* 2014; 23(10): 2166-74.
71. Glossop ND, Hu RW, Randle JA. Computer-aided pedicle screw placement using frameless stereotaxis. *Spine* 1996; 21(17): 2026-34.
72. Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)* 1990; 15(1): 11-4.
73. Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, et al. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image (O-arm)-based navigation system for cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg Spine* 2011; 15(5): 472-8.

74. Grevenstein D, Scheyerer MJ, Meyer C, et al. Impact of lumbar pedicle screw positioning on screw stability - A biomechanical investigation. Clin Biomech (Bristol, Avon) 2020; 74: 66-72.

7. Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Median-sagittal Schnitt der cervicalen Wirbelsäule mit Anteilen des Craniums ¹² .	10
Abbildung 2: Aufsicht auf einen „typischen“ Halswirbelkörper ¹² .	11
Abbildung 3: 3-Säulenmodell nach Denis ²² .	13
Abbildung 4: AO Spine Klassifikation der subaxialen Halswirbelsäulenverletzung ³ .	14
Abbildung 5: Aufsicht auf die dorsale subaxiale Halswirbelsäule mit Dornfortsätzen und Wirbelbögen. Die Nackenmuskulatur ist über die eingebrachten Spreizer zu beiden Seiten verdrängt ³³ .	16
Abbildung 6: Anatomischer Eintrittspunkt und Verschraubungswinke der Massa lateralis Schrauben im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule ³³ .	17
Abbildung 7: Anatomischer Eintrittspunkt und Verschraubungswinke der Pedikel Schrauben im Bereich der subaxialen Halswirbelsäule ³³	17
Abbildung 8: Axialer Querschnitt des Zugangs nach Smith und Robinson mit eingebrachten Spreizern an den Mm. Longus colli (LC). Markiert sind weiterhin Ösophagus (Es) und Trachea (Tr) ³⁹ .	18
Abbildung 9: BrainLAB Curve mit der Navigationseinheit mit 2 Monitoren links im Bild und Schwenk-Arm mit 2 Infrarotkameras und Steuerhandgriff hinten rechts im Bild.	24
Abbildung 10: Referenz mit 3 Infrarotlicht reflektierenden Kugeln ^{47,48}	25
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Caspar Spreizers der über 2 Schanzschrauben in ventrale Wirbelkörper eingebracht wurde. An diesem ist über das dunkelgrau hervorgehobene individuelle Verbindungsstück die Referenz fixiert ⁴⁷ .	25
Abbildung 12: Caspar Spreizer mit fixierter Referenz im anatomischen Präparat (unten im Bild), oben im Bild die Bohrmaschine mit K-Draht und Bohrhülse mit Referenzkugeln ⁴⁷ .	26
Abbildung 13: Intraoperative Navigation mit links oben einer Übersichtsaufnahme, rechts oben eine Ansicht von ventral (coronar), links unten eine seitliche Ansicht (sagital), und rechts unten eine Aufsicht (axial) auf den zu operierenden Wirbelkörper. Dabei ist der Pointer grün dargestellt und im Anschluss ein ebenfalls grünes Zentimetermaß zur Bestimmung einer möglichen Schraubenlänge ⁴⁷	26
Abbildung 14: Caspar Spreizer (links) mit 2 Schanz-Schrauben (unten rechts) und 2 DensAccess Schrauben (oben rechts).	27
Abbildung 15: Zentral eingestellter subaxialer Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch eingezeichneter Geraden durch den Prozessus spinosus und dazu angelegt den Winkel durch den linken Pedikel.	28

Abbildung 16: Zentral entlang des Pedikels eingestellter Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch rot eingezeichneter Strecke der maximal möglichen Schraubenlänge im linken Pedikel. Die Messmethode entspricht der gängigen Methoden in der Literatur ^{49,50} .	29
Abbildung 17: Zentral entlang des Pedikels eingestellter Halswirbelkörper in der axialen Ansicht im IMPAX EE mit schematisch gelb eingezeichneter Strecke der maximalen Pedikelweite. Die Messmethode entspricht der gängigen Methoden Literatur ^{49,50} .	30
Abbildung 18: Darstellung des multiplanaren CTs in IMPAX EE mit in der axialen Schicht links im Bild (vollständig abgebildete Schraube) einer Grad 1 Schraubenlage nach Gertzbein und Robins (modifiziert) ⁴⁷ .	31
Abbildung 19: Boxplot der Pedikelweite nach Wirbelkörper sortiert	33
Abbildung 20: Boxplot der maximalen Schraubenlängen nach Halswirbelkörper sortiert.	34
Abbildung 21: Boxplot von Pedikelwinkeln der einzelnen Halswirbelkörper.	36
Abbildung 22: Schraubenlage nach Halswirbelkörper sortiert und nach guter beziehungsweise akzeptabler und schlechter Schraubenlage gruppiert.	38

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hardware	21
Tabelle 2: Op-Materialien	21
Tabelle 3: Software	22
Tabelle 4: Schraubenlage von Pedikelschrauben in Halswirbelkörpern.	31
Tabelle 5: Ergebnisse Pedikelweite	32
Tabelle 6: Ergebnisse Schraubenlänge	34
Tabelle 7: Pedikelwinkel	35
Tabelle 8: Schraubenlage	37

8. Vorabveröffentlichung von Ergebnissen

Bredow J, Meyer C, Siedek F, et al. Accuracy of 3D fluoro-navigated anterior transpedicular screws in the subaxial cervical spine: an experimental study on human specimens. Eur Spine J 2017; 26(11): 2934-40.