

Einfluss der sagittalen Balance der Halswirbelsäule auf Anschlussdegenerationen und Reoperationsrate nach ACDF und ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese

Magnus Michaelis

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine and Health zur Erlangung
eines
Doktors der Medizin (Dr. med.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Gabriele Multhoff

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr. Yu-Mi Ryang
2. apl. Prof. Dr. Sebastian Siebenlist

Die Dissertation wurde am 02.07.2024 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Medicine and Health am 19.06.2025
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1. Zusammenfassung.....	1
2. Einleitung.....	3
2.1. Anatomie der Halswirbelsäule	3
2.2. Biomechanische Aspekte der Halswirbelsäule	5
2.2.1. Die sagittale Balance	7
2.3. Anschlussdegeneration.....	11
2.4. Operative Therapie.....	13
2.4.1. OP-Technik (ACDF und ACCF).....	14
2.4.2. Ventrale Plattenosteosynthese.....	15
3. Zielsetzung der Arbeit.....	17
3.1. Fragestellung und Ziele.....	17
3.2. Hypothesen.....	18
4. Material und Methoden	20
4.1. Patientenkollektiv.....	20
4.2. Datenerhebung.....	20
4.3. Datenschutz.....	21
4.4. Ethische Aspekte	21
4.5. Allgemeine Daten	21
4.6. Radiologische Messwerte	22
4.6.1. Präoperative Bildgebung.....	22
4.6.2. Postoperative Bildgebung	25
4.6.3. Follow-up Bildgebung.....	25
4.6.4. Cage-Sinterung	26
4.6.5. Parameter der sagittalen Balance.....	26
4.7. Statistische Methoden	29
5. Ergebnisse	31
5.1. Verteilung der Basischarakteristika	31

5.2. Allgemeine Operationsdaten	33
5.2.1. Auswertung Allgemeine Operationsdaten	34
5.3. Sagittale Balance	35
5.3.1. Präoperative Bildgebung.....	35
5.3.2. Postoperative Bildgebung	36
5.3.3. Veränderung der Parameter im Verlauf.....	36
6. Diskussion	39
6.1. Eignung der Parameter zum Erfassen der sagittalen Balance	40
6.1.1. Korrelation der Parameter.....	40
6.1.2. Die Parameter im postoperativen Verlauf	41
6.2. ASD im postoperativen Verlauf.....	42
6.3. Parameter der sagittalen Balance als Prädiktor für eine ASD-bedingte Reoperation	43
6.3.1. Präoperative Bildgebung.....	43
6.3.2. Postoperative Bildgebung	44
6.4. Untersuchung der Sinterungstendenz der Cages	44
6.5. Weitere Faktoren als mögliche Prädiktoren für die Wahrscheinlichkeit einer Reoperation	45
6.6. Limitationen der Studie	45
7. Schlussfolgerung	47
Danksagung.....	49
Quellenverzeichnis	50

Abkürzungsverzeichnis

A.	<i>Arteria</i>
ACCF	<i>anteriore zervikale Korpektomie und Fusion</i>
ACDF	<i>Anteriore zervikale Diskektomie und Fusion</i>
ASD	<i>adjacent segment disease</i>
BMD	<i>bone marrow density - Knochendichte</i>
BWS	<i>Brustwirbelsäule</i>
CL C2-C7	<i>Cobb-Line C2-C7</i>
COG	<i>center of gravity</i>
HU	<i>Hounsfield-Units</i>
HW	<i>Halswirbel</i>
HWK	<i>Halswirbelkörper</i>
HWS	<i>Halswirbelsäule</i>
LL	<i>lumbar lordosis</i>
M.	<i>musculus</i>
MANOVA	<i>multivariate Varianzanalyse</i>
N.	<i>Nervus</i>
OR	<i>Odds ratio</i>
PEEK	<i>Polyetheretherketon</i>
PI	<i>pelvic incidence</i>
Proc.	<i>Processus</i>
PT	<i>pelvic tilt</i>
Seg C Lordosis	<i>Segmentlordose</i>
SS	<i>sacral slope</i>
SVA	<i>sagittal vertical alignment</i>
TK	<i>thoracic kyphosis</i>

Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung 1: Knöcherne HWS ventral; Ausschnitt: 4. Halswirbelkörper (Schünke, 2005) S. 85, 102</u>	3
<u>Abbildung 2: Das Bewegungssegment nach Junghans (Frisch, 2003)</u>	4
<u>Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Bandscheibe (F. Yang et al., 2018)</u>	5
<u>Abbildung 4: Anschlussdegeneration im kaudalen Segment nach operativer Fusion (Chung, Park, Seo, & Kim, 2016)</u>	11
<u>Abbildung 5: Diskektomie mit scharfem Löffel (A. König & Spetzger, 2014)</u>	15
<u>Abbildung 6: 4-Level ACDF mit ventraler Plattenosteosynthese (Deutsch et al., 2003)</u>	16
<u>Abbildung 7: Röntgenstudie einer ACDF mit ventraler Verplattung von C4 - C5</u>	22
<u>Abbildung 8: Klassifikation der Facettengelenksdegeneration nach Kellgren und Lawrence (Kellgren & Lawrence, 1957)</u>	23
<u>Abbildung 9: Weishaupt Klassifikation der Facettengelenksdegeneration (Weishaupt et al., 1999)</u>	24
<u>Abbildung 10: Funktionsaufnahmen HWS in Flexion und Extension (Kaiser et al., 2009)</u>	25
<u>Abbildung 11: Radiologische Parameter der sagittalen Balance (Kwon et al., 2017)</u>	26
<u>Abbildung 12: Sagittal vertical alignment und k-line (Scheer, Tang, Smith, Acosta, Protopsaltis, Blondel, Bess, Shaffrey, Deviren, Lafage, Schwab, Ames, et al., 2013)</u>	28
<u>Abbildung 13: Veränderung der Mittelwerte von CL C2-C7, T1-slope und Seg C Lordosis im Verlauf (γ-Achse = Winkel in $^{\circ}$)</u>	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Segmentale Beweglichkeit der HWS mit Mittelwerten und Grenzwerten in Winkelgraden (°)(White & Panjabi, 1990)	6
Tabelle 2: Normwerte der radiologischen Parameter zur sagittalen Balance der Wirbelsäule	8
Tabelle 3: Normwertbereiche der Parameter der zervikalen sagittalen Balance	27
Tabelle 4: Revisionsoperationen bei ASD	32

1. Zusammenfassung

Hintergrund: In dieser Arbeit wird der Zusammenhang zwischen der sagittalen Balance der Halswirbelsäule (HWS) und dem Risiko für eine Reoperation bei *adjacent segment disease* (ASD – symptomatische Anschlussdegeneration) nach *anteriorer zervikaler Diskektomie und Fusion* (ACDF) und *anteriorer zervikaler Korpektomie und Fusion* (ACCF) mit ventraler Plattenosteosynthese untersucht.

Material & Methoden: Retrospektiv wurden Daten von 155 Patienten ausgewertet, die sich einer ACDF oder ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese unterzogen. Die Parameter der sagittalen Balance wurden zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen: Präoperativ, Postoperativ und zu einem Follow-up-Termin. Die entscheidenden Parameter waren: „HWS-Lordose“, „Segmentlordose“, „T1-slope“, „k-line“, „C2-sagittal vertical axis (SVA)“, „C7-SVA“ und „center of gravity (COG)-SVA“. Außerdem wurde die Rate an Reoperationen erfasst und analysiert, ob ASD der Grund für die Reoperation war. Die gemessenen Parameter wurden anschließend mittels binär logistischer Regressionsanalyse dahingehend überprüft, ob sie im Zusammenhang mit dem Reoperationsrisiko bei ASD stehen.

Ergebnisse: Unsere Studie konnte keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der sagittalen Balance der HWS und der Rate an Reoperationen zeigen. Weder präoperativ, noch postoperativ gingen eine Abweichung der Lordose (Odds ratio (OR) 1.003; 95% CI: 0.0.923 - 1.083; p = 0.946) oder der k-line (OR 0.960; 95% CI: 0.885 - 1.035; p = 0.293) vom Mittelwert der Studienpopulation mit einem größeren Risiko für das Auftreten einer symptomatischen Anschlussdegeneration einher.

Jedoch ergaben sich Tendenzen, welche einen Zusammenhang zwischen der sagittalen Balance der HWS und der Reoperationsrate vermuten lassen. Der T1-slope scheint bereits präoperativ Rückschlüsse auf das Risiko für eine Reoperation ziehen zu lassen. Je flacher er präoperativ ist, desto größer ist das Risiko.

Postoperativ kann man vermutlich über die C2-SVA darauf schließen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zur Ausbildung von ASD kommt und wie wahrscheinlich eine damit verbundene Reoperation ist. Je größer die C2-SVA, desto größer das Risiko einer Reoperation. Für die übrigen Parameter ergaben sich weder präoperativ, noch postoperativ relevante Zusammenhänge.

Schlussfolgerung: Die sagittale Balance hat sehr wahrscheinlich einen Einfluss auf die Entstehung von ASD. Fehlstellungen erhöhen vermutlich das Risiko für ASD und somit auch das Risiko für eine Reoperation. Weitere Studien sind notwendig, um den Einfluss der sagittalen Balance auf das OP-Outcome nach ACDF und ACCF, sowie ihre Rolle bei der Entstehung von ASD besser zu verstehen.

2. Einleitung

2.1. Anatomie der Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule setzt sich zusammen aus sieben Segmenten (Abbildung 1).

Diese umfassen den 1. Halswirbel (HW) (C1; Atlas), den 2. HW (C2; Axis) und HW 3 bis 7, inklusive Bandapparat und Facettengelenken.

Atlas und Axis unterscheiden sich sowohl morphologisch, als auch funktionell von den restlichen Wirbeln. Sie stellen über das Atlantooccipitalgelenk und das Atlantoaxialgelenk die Verbindung zwischen Kopf und Hals her und ermöglichen hier als Kugelgelenk die Beweglichkeit in allen Freiheitsgraden (Bogduk & Mercer, 2000; Niethard, Pfeil, & Biberthaler, 2009; Schünke, 2005).

Die Halswirbel 3 bis 7 ähneln sich untereinander in ihrem Aufbau (Abbildung 1: Ausschnitt) und umschließen knöchern das Foramen vertebrale, in welchem das Rückenmark verläuft (Niethard et al., 2009; Schünke, 2005).

Die Wirbelkörper, Corpora vertebrae, sind würfelförmig und haben lateral an der kranialen Fläche beidseits einen kleinen Vorsprung, den Processus (Proc.) uncinatus, welcher Rotationsstabilität gibt und die Kompression des Rückenmarks bei Lateralflexion der HWS verhindert (Bogduk & Mercer, 2000).

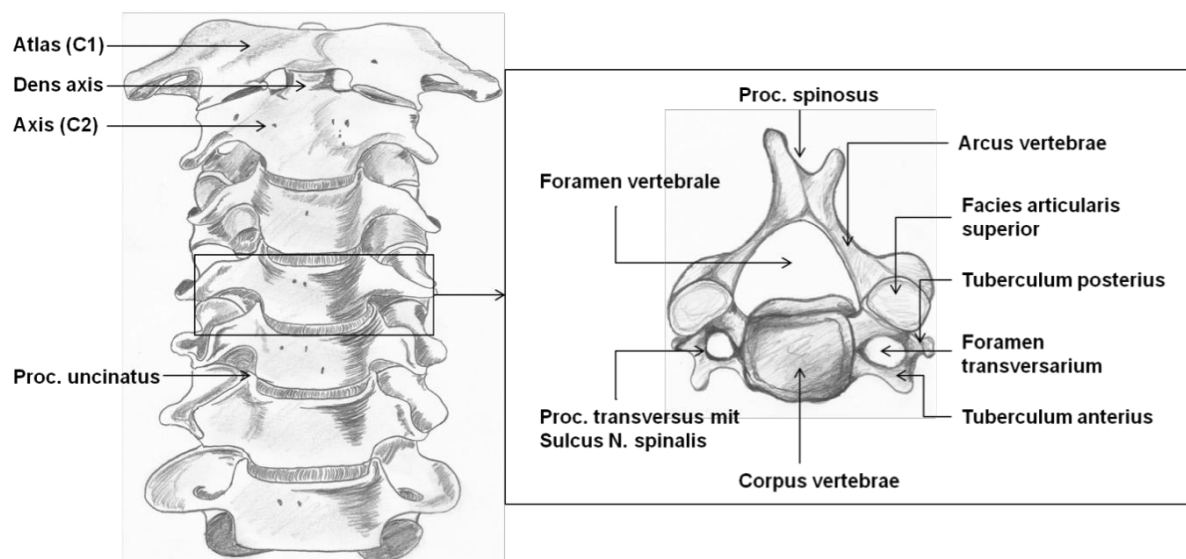


Abbildung 1: Knöcherne HWS ventral; Ausschnitt: 4. Halswirbelkörper (Schünke, 2005) S. 85, 102

Zu beiden Seiten des Wirbelkörpers schließt sich der Proc. transversus an, welcher sich aus einer ventralen und einer dorsalen Spange zusammensetzt. Diese umschließen das Foramen transversarium, in welchem ab HW6 die Arteria (A.) vertebralis in Richtung Kopf verläuft. Der Sulcus Nervus (N.) spinalis bildet den Weg für die Spinalnerven aus dem Rückenmark in die Peripherie.

Kranial und kaudal des Proc. transversus finden sich die Gelenkflächen der Facettengelenke. Dorsal wird das Foramen vertebrale durch den Arcus vertebrae begrenzt, welcher schließlich in den Proc. spinosus übergeht (Schünke, 2005).

Das Bewegungssegment nach Junghans (Abbildung 2) bezeichnet die kleinste funktionelle Einheit der Wirbelsäule und umfasst zwei benachbarte Wirbel inklusive Facettengelenke, der dazwischen liegenden Bandscheibe, dem Bandapparat (Ligamentum longitudinale anterior et posterior und das Ligamentum flavum) und der autochtonen Rückenmuskulatur (A. König & Spetzger, 2014).

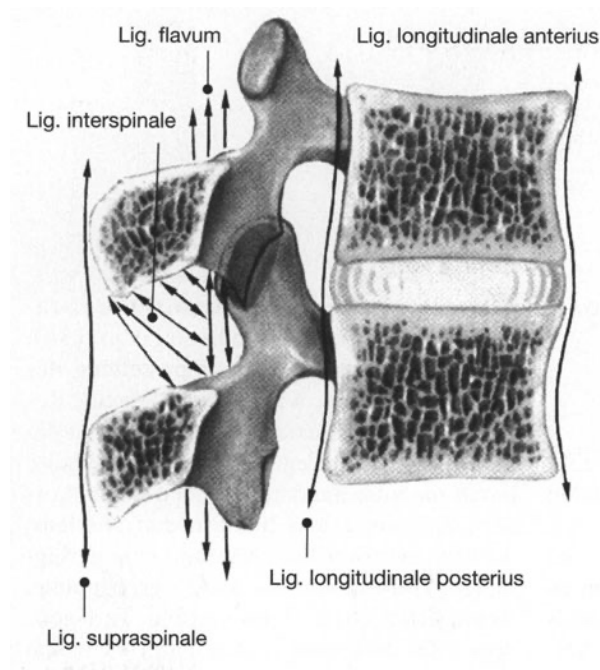


Abbildung 2: Das Bewegungssegment nach Junghans (Frisch, 2003)

Die Bandscheibe besteht aus einem zentral gelegenen Gallertkern, dem Nucleus pulposus, der von einem konzentrisch angeordnetem Faserring, dem Anulus fibrosus, umgeben ist (Abbildung 3). Der Anulus fibrosus ist unterteilt in eine Außenzone aus straffem, konzentrisch aufgebautem, zugfestem Bindegewebe (Typ-I-Kollagenfasern) und ein inneres faserknorpeliges Gewebe (Typ-II-Kollagenfasern), welches in den hyalinen Knorpel der Wirbeldeckplatten übergeht. Im Bereich der

Halswirbelsäule sind die Bandscheiben anterior höher als posterior. Dies begünstigt die natürliche lordotische Krümmung in der sagittalen Ebene (Benninghoff & Drenckhahn, 2014; Siegenthaler & Amann-Vesti, 2006).

Axiale Belastung der Wirbelsäule wird überwiegend durch die Bandscheiben gedämpft. Durch Stauchung verformt sich der Nucleus pulposus, was wiederum zu einer Dehnung des Anulus fibrosus führt. Durch dessen straffe und elastische Fasern wird letztlich die axiale Belastung absorbiert und die Bandscheibe zurück in ihre ursprüngliche Form gebracht.

Axiale Belastungen werden also in erster Linie durch den Nucleus pulposus aufgenommen, Rotations- und Scherkräfte kompensiert im Wesentlichen der Anulus fibrosus durch Art und Anordnung seiner Fasern (A. König & Spetzger, 2014).

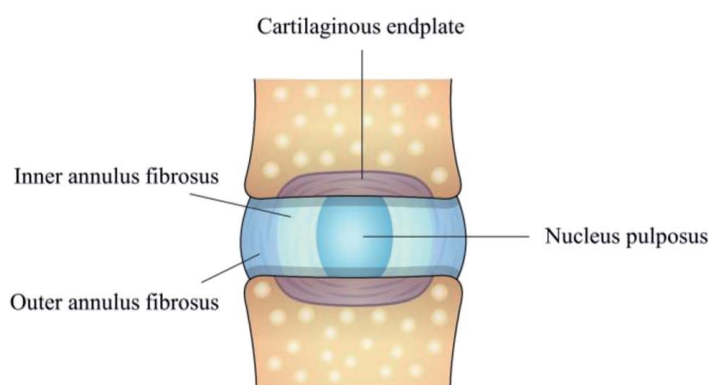


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Bandscheibe (F. Yang et al., 2018)

2.2. Biomechanische Aspekte der Halswirbelsäule

Neben zahlreichen anderen Funktionen, ist der menschliche Kopf das Zentrum für die Wahrnehmung verschiedenster sensorischer Reize (z.B. Sehen, Hören, Riechen, etc.). Um seine Funktion optimal erfüllen zu können, ist er auf die Unterstützung der HWS angewiesen. Neben der Tatsache, dass sie als Stützgerüst den Kopf mit dem Körper verbindet und dabei dessen Gewicht trägt, hat sie im Vergleich zur restlichen Wirbelsäule die größte Bewegungsfreiheit und sorgt dafür, dass sich der Kopf im dreidimensionalen Raum bewegen und orientieren kann.

Grundsätzlich sind sechs Bewegungsrichtungen möglich: Lateralflexion jeweils 35°, Ventralflexion 65°, Dorsalextension 40° und Rotation jeweils 50° (Schünke, 2005).

Betrachtet man jedoch die einzelnen Segmente, so ergeben sich für jedes Bewegungssegment unterschiedliche Bewegungsumfänge (Tabelle 1).

Bewegungsrichtung	C0/1	C1/2	C2/3	C3/4	C4/5	C5/6	C6/7
Kombinierte Flexion/ Extension	25°	20°	10° (5-16°)	15° (7-26°)	20° (13-29°)	20° (13-29°)	17° (6-26°)
Lateralflexion jeweils pro Seite	5°	5°	10° (11-20°)	11° (9-15°)	11° (0-16°)	8° (0-16°)	7° (0-17°)
Rotation jeweils pro Seite	5°	40°	3° (0-10°)	7° (3-10°)	7° (1-12°)	7° (2-12°)	6° (2-10°)

Tabelle 1: Segmentale Beweglichkeit der HWS mit Mittelwerten und Grenzwerten in Winkelgraden (°)(White & Panjabi, 1990)

Physiologisch präsentiert sich die HWS im sagittalen Röntgenbild mit einer lordotischen Krümmung. Dies ist bedingt durch die Form der Wirbelkörper und Bandscheiben und stellt so einen Ausgleich zur Kyphose im Bereich der Brustwirbelsäule (BWS) dar (Gay, 1993).

Biomechanisch kann man die HWS in drei Säulen unterteilen. Zum einen gibt es das Modell nach Louis mit einer anterioren Säule (Wirbelkörper und Bandscheiben), sowie zwei posterioren Säulen (die Facettengelenke). Auf diese drei Säulen verteilt sich über Atlas und Axis das Gewicht des Kopfes (Louis, 1985; Pal & Sherk, 1988). Zervikal sind 64% vom Gewicht des Kopfes auf die beiden posterioren Säulen verteilt und 36% auf die anteriore Säule. Schaut man auf die lumbalen

Wirbelsäulenabschnitte, so zeigt sich hier trotz lordotischer Krümmung eine andere Gewichtsverteilung. 67%-82% der Masse lasten auf der vorderen Säule, wohingegen nur 18%-33% auf den beiden posterioren Säulen liegen (Lorenz, Patwardhan, & Vanderby, 1983; Nachemson, 1960).

Eine andere Möglichkeit der Einteilung der Wirbelsäule ist das 3-Säulen-Modell nach Denis. Hier wird die vordere Säule durch das anteriore longitudinale Ligament und den vorderen Teil von Bandscheibe und Wirbelkörper gebildet. Die mittlere Säule besteht aus dem posterioren Teil von Wirbelkörper und Bandscheibe, sowie dem posterioren longitudinalen Ligament. Die posteriore Säule wird durch den Wirbelbogen und die zugehörigen Fortsätze und Bänder gebildet (Denis, 1983).

2.2.1. Die sagittale Balance

Die sagittale Balance der Wirbelsäule, das heißt die optimale Ausrichtung der einzelnen Segmente zueinander, hat zum Ziel, dass sich der Körper ohne äußere Hilfe und mit minimalem Kraftaufwand aufrecht und in Balance halten kann (F. Schwab, Lafage, Boyce, Skalli, & Farcy, 2006). Sowohl die Wirbelsäulenkrümmung, als auch die Stellung von Becken und Beinen, sowie das COG (die Schwerkraftlinie) müssen hierfür optimal aufeinander abgestimmt sein und werden mit Hilfe verschiedener Parameter erfasst (Berthonnaud, Dimnet, Roussouly, & Labelle, 2005; Berthonnaud, Labelle, et al., 2005; M. S. Park et al., 2013; F. Schwab, Patel, Ungar, Farcy, & Lafage, 2010):

- Pelvic incidence (PI): Der Winkel zwischen einer Geraden welche senkrecht zur Mitte der oberen sakralen Endplatte verläuft und einer Linie, welche diesen Punkt mit der Hüftkopfachse verbindet.
- Pelvic tilt (PT): Der Winkel zwischen der Vertikalen und einer Linie zwischen dem Mittelpunkt der oberen sakralen Endplatte und der Hüftkopfachse.
- Sacral slope (SS): Der Winkel zwischen der Horizontalen und der oberen sakralen Endplatte.
- Lumbar lordosis (LL): Der Winkel zwischen einer Linie durch die superiore Endplatte des ersten Lendenwirbelkörpers und einer Linie einer Linie durch die obere sakrale Endplatte.
- Thoracic kyphosis (TK): Der Winkel zwischen einer Linie durch die superiore Endplatte des vierten thorakalen Wirbelkörpers und einer Linie durch die inferiore Endplatte des zwölften thorakalen Wirbelkörpers.

Der physiologische Grad der Wirbelsäulenkrümmung wurde bereits ausführlich diskutiert in der Literatur. In verschiedenen Studien zeigte sich eine hohe Varianz physiologischer Werte für die Ausrichtung der Wirbelsäule (Tabelle 2) (Berthonnaud, Dimnet, et al., 2005; Boulay et al., 2006; Harding, 2009; Legaye, Duval-Beaupere, Hecquet, & Marty, 1998; Roussouly, Gollogly, Berthonnaud, & Dimnet, 2005; Roussouly, Gollogly, Nosedá, Berthonnaud, & Dimnet, 2006; Roussouly & Nnadi,

2010; F. Schwab et al., 2006; F. Schwab et al., 2010; Stagnara et al., 1982; Vialle et al., 2005).

Parameter	Schwab et al, 2006	Berthonnau et al, 2005	Vialle et al, 2005	Legaye et al, 1998	Boulay et al, 2006	Roussouly 2006
Anzahl der Teilnehmer	75	160	300	49	149	153
Alter	49.3 Jahre (18-80)	25.7 Jahre (20-70)	35 Jahre (20-70)	24 Jahre (19-50)	30.8 Jahre (19-50)	27 Jahre (18-48)
Verhältnis Männer/ Frauen	0.56	0.95	0.63	0.56	0.52	0.52
PI	52±10	51±5.3 (33.7-83.7)	54.7±10.6 (33-82)	~52.0±10.0	53.1±9.0 (33.7-77.5)	50.6±10.2 (27.9-82.8)
PT	15±7	12.1±3.2 (-5.1-30.5)	13.2±6.1 (-4.5-27)	~11.0±5.5	12.0±6.4 (-2-30)	11.1±5.9 (-2.8-23.7)
SS	30±9	39.7±4.1 (21.2-65.9)	41.2±8.4 (17-63)	~40.0±8.5	41.2±7.0 (0.6-19.7)	39.6±7.6 (17.5-63.4)
LL	60±12	42.7±5.4 (16-71.9)	60.2±10.3 (30-89)	~60.0±10.0	66.4±9.5 (44.8-87.2)	61.2±9.4 (39.9-83.7)
TK	41±12	47.5±4.8 (22.5-70.3)	40.6±10.0 (0-69)	~43.0±13.0	53.8±10.1 (33.2-83.5)	46.3±9.5 (23.0-65.9)

Tabelle 2: Normwerte der radiologischen Parameter zur sagittalen Balance der Wirbelsäule

Anhand dieser Parameter können Ausmaß der Deformität, sowie das Ausmaß der Korrektur, welche notwendig wäre, um das physiologische Gleichgewicht

wiederherzustellen, bestimmt werden (Harding, 2009; Roussouly et al., 2005; Roussouly & Nnadi, 2010).

Die zervikale sagittale Balance beschreibt die Haltung und Ausrichtung der Halswirbelsäule in der sagittalen Ebene (Patwardhan et al., 2018).

Wie oben beschrieben ist die Halswirbelsäule hoch komplex und hat das größte Bewegungsausmaß aller Wirbelsäulenabschnitte. Dies macht sie besonders anfällig für Pathologien, welche häufig zu einer HWS-Fehlstellung (sagittale Imbalance) führen, oder aber ihren Ursprung in einer Fehlstellung haben.

Untersuchungen zur Folge liegt die Prävalenz zervikaler Beschwerden weltweit bei ca. 5% (Bao et al., 2017; Hoy et al., 2014) und gerade bei Menschen mit zervikaler Fehlstellung, wie zum Beispiel einer Kyphose, treten die Beschwerden besonders häufig auf. Eine kyphotische Fehlstellung der HWS kann zu einer Myelopathie führen. Je ausgeprägter die Kyphose ist, desto länger wird der Weg durch den zervikalen Spinalkanal. Das Rückenmark spannt sich dabei ventral gegen die kyphotisch gekrümmten Wirbelkörper, was zu einer Zunahme von Druck und longitudinaler Spannung führt (Albert & Vacarro, 1998; Deutsch, Haid, Rodts, & Mummaneni, 2003). Dies führt wiederum zu einer Rückenmarksabflachung. Die ventralen und dorsalen Anteile werden zusammengedrückt, während sich die lateralen Anteile ausdehnen. Es kommt ebenfalls zu einer Demyelinisierung und dem Untergang von Nervengewebe (Shimizu et al., 2005).

Zahlreiche Studien zeigen, dass eine Fehlstellung der Halswirbelsäule mit unterschiedlichen Beschwerden einhergeht, wie z.B. Kopfschmerzen und Nackenschmerzen, und somit zu einer Einschränkung der Lebensqualität führt (McAviney, Schulz, Bock, Harrison, & Holland, 2005; Villavicencio et al., 2011; Yip, Chiu, & Poon, 2008).

Mittels verschiedener Parameter (siehe 4.6.5 Parameter der sagittalen Balance) kann man die sagittale Balance erfassen und Fehlstellungen diagnostizieren (Scheer, Tang, Smith, Acosta, Protopsaltis, Blondel, Bess, Shaffrey, Deviren, Lafage, Schwab, Ames, et al., 2013). Hierzu zählen u.a. der Lordosewinkel der HWS, der T1-slope (der Neigungswinkel des ersten Brustwirbelkörpers) und die C2-C7-SVA, also die vertikale sagittale Ausrichtung der HWS (Abstand zwischen einem Senklot von HWK1/2 oder dem COG und der Hinterkante von HWK7). Liegt zum Beispiel eine vorgestreckte Kopfhaltung vor, das heißt, ist der Kopf im Gegensatz zur Neutralstellung im Verhältnis zu den Schultern nach vorne geschoben, so

verschieben sich auch die Werte für die Parameter der sagittalen Balance. Die SVA-Werte nehmen zu. Diese Zunahme ist laut verschiedener Studien mit einer Verschlechterung des OP-Ergebnisses nach HWS-Operationen vergesellschaftet (Bao et al., 2017; Tang et al., 2015).

Knott et al. fanden heraus, dass der T1-slope (Neigungswinkel des ersten Brustwirbelkörpers) mit den SVA-Werten korreliert. Patienten mit einem hohen T1-slope ($>25^\circ$) und HWS Beschwerden wiesen alle eine positive sagittale Imbalance mit einer SVA von mindestens 10cm (C2-C7-SVA) auf, wohingegen Patienten mit einem niedrigen T1-slope ($<13^\circ$) keine sagittale Imbalance und keine Beschwerden aufwiesen (Knott, Mardjetko, & Techy, 2010).

Auch wirbelsäulenabschnittsübergreifend zeigt sich, dass die Parameter der sagittalen Balance miteinander korrelieren. Fehlstellungen der Lendenwirbelsäule oder des Beckens können ebenso wie eine Hyperkyphose der Brustwirbelsäule kompensatorisch zu einer Erhöhung des T1-slopes und somit zu einer vorgestreckten Kopfhaltung, bzw. einer Imbalance der HWS führen. Ebenso kann anders herum eine Fehlstellung der HWS zu Veränderungen der sagittalen Balance der restlichen Wirbelsäulenabschnitte führen, um eben diese Fehlstellung auszugleichen (Ames et al., 2013; Cacho-Rodrigues, Campana, Obeid, Vital, & Gille, 2016; Lin et al., 2015; Scheer, Tang, Smith, Acosta, Protopsaltis, Blondel, Bess, Shaffrey, Deviren, Lafage, Schwab, & Ames, 2013; Smith et al., 2012).

Sowohl die Parameter der sagittalen Balance der Halswirbelsäule, als auch die einzelnen Wirbelsäulenabschnitte stehen in einer engen Beziehung zueinander und sind durch präzise Abstimmung untereinander dafür verantwortlich, die sagittale Balance aufrechtzuerhalten. Bei Störungen der Balance durch z.B. degenerative oder traumatische Erkrankungen versucht der Körper durch Veränderungen in der Ausrichtung anderer Wirbelsäulenabschnitte die entstandene Fehlstellung zu kompensieren, um weiterhin eine aufrechte Haltung und einen horizontalen Blick zu ermöglichen. Ein Persistieren der sagittalen Imbalance führt in den meisten Fällen über kurz oder lang zu einem Versagen der Kompensationsmechanismen, sodass behandlungsbedürftige Beschwerden entstehen, welche nicht selten zu einer Operation führen (F. Schwab et al., 2010). Ziel einer Operation ist, die physiologische Wirbelsäulenkrümmung wieder herzustellen um postoperativ möglichst für Schmerzfreiheit und eine gute Beweglichkeit zu sorgen (Jean, 2014; F. Schwab et al., 2010). Die sagittale Balance fließt bereits in die präoperative Planung mit ein um

eine postoperative Imbalance zu vermeiden (Alijani & Rasoulian, 2020; Blondel et al., 2013). Eine postoperative Fehlstellung erhöht das Risiko für ein erneutes Auftreten von Beschwerden durch z.B. Anschlussdegeneration (Hansen, Kim, Van Alstyne, Skelly, & Fehlings, 2012).

2.3. Anschlussdegeneration

Die Anschlussdegeneration ist ein häufiges Phänomen nach operativer Versteifung der Wirbelsäule und entsteht kranial und kaudal der operierten Segmente.

Sichtbar ist die Anschlussdegeneration z.B. in Form von Osteophyten, degenerativen Bandscheibenveränderungen und Hypermobilität bis hin zur Instabilität (Abbildung 4).

Osteophyten bezeichnen knöcherne Ausziehungen an den Wirbelkörperkanten mit zunächst horizontalem, später auch vertikalem Wachstum. Die Degeneration der Bandscheibe stellt sich im Röntgenbild als Höhenminderung der Zwischenwirbelräume dar. In den benachbarten Segmenten zeigen sich subchondrale Sklerosierungen, Mikrofrakturen, Einblutungen, Fibrosierungen, Nekrosen und Arthrosen (Steinhagen, Habermann, Petersen, Kothe, & Ruther, 2006). Auch kann es zu einer Hypertrophie und Verkalkung des Ligamentum longitudinale anterius kommen.

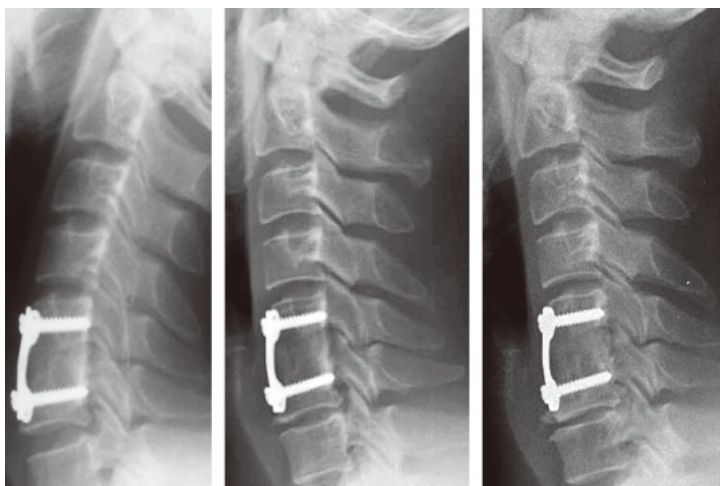


Abbildung 4: Anschlussdegeneration im kaudalen Segment nach operativer Fusion (Chung, Park, Seo, & Kim, 2016)

Der biomechanische Mechanismus, wie genau es zur Degeneration und den damit verbundenen Beschwerden kommt, ist Gegenstand vieler Studien. Wahrscheinlich ist, dass die Fusion einzelner Segmente zu einer Veränderung der gesamten Biomechanik der Wirbelsäule führt (Chang et al., 2007; Lopez-Espina, Amirouche, & Havalad, 2006; Rosenthal & Kim, 2013). Insbesondere in den Segmenten, welche kranial und kaudal an das operierte Gebiet angrenzen, kommt es zu einer kompensatorischen Steigerung der Bewegung und der Belastung. Dies führt zu einer größeren Beanspruchung der Bandscheibe und schlussendlich über zelluläre Umbauprozesse zur Bandscheibendegeneration (Hutton et al., 1998; Kosuri, Venumadhav, & Ks, 2014). Die Bandscheiben sind auf eine Nährstoffversorgung durch Diffusion angewiesen und der erhöhte mechanische Stress sorgt dafür, dass die Nährstoffversorgung nicht mehr suffizient ist (Dmitriev, Kuklo, Lehman, & Rosner, 2007; Eck et al., 2002; Maiman, Kumaresan, Yoganandan, & Pintar, 1999; Matsunaga et al., 1999; D. H. Park et al., 2007; Ragab, Escarcega, & Zdeblick, 2006; J. S. Schwab, Diangelo, & Foley, 2006).

Werden die oben beschriebenen morphologischen Korrelate der Anschlussdegeneration symptomatisch, spricht man von *adjacent segment disease*. ASD ist definiert als das Auftreten neuer Myelopathie- und Radikulopathie-Symptomatik in den Segmenten, welche direkt kranial oder kaudal an das operativ fusionierte Segment anschließen (Hilibrand & Robbins, 2004; Ishihara, Kanamori, Kawaguchi, Nakamura, & Kimura, 2004; Kepler & Hilibrand, 2012; Seo & Choi, 2008). Hierbei handelt es sich um eine rein klinische Diagnose, welche anhand der Beschwerden der Patienten gestellt wird. Bisher konnte in verschiedenen Studien jedoch kein Zusammenhang zwischen radiologisch nachgewiesener Degeneration anschließender Wirbelsäulensegmente und dem Auftreten von adjacent segment disease beobachtet werden (Baba et al., 1993; Hilibrand, Carlson, Palumbo, Jones, & Bohlman, 1999; Hilibrand & Robbins, 2004).

Etwa 2 – 3% der Patienten sind nach zervikaler Fusion der Wirbelsäule jährlich von ASD betroffen (Kepler & Hilibrand, 2012). Innerhalb der ersten 10 Jahre nach Operation soll diese Zahl sogar auf 25% steigen (Rihn, Lawrence, Gates, Harris, & Hilibrand, 2009). Andere Studien zeigen, dass 9 – 17% der Patienten nach anteriorer zervikaler Diskektomie und Fusion (ACDF) eine therapiebedürftige Anschlussdegeneration entwickeln (Bohlman, Emery, Goodfellow, & Jones, 1993;

Lunsford, Bissonette, Jannetta, Sheptak, & Zorub, 1980; Williams, Allen, & Harkess, 1968).

Dabei ist es für das Outcome scheinbar unerheblich, welche Diagnose zur operativen Versteifung geführt hat. Eine beschleunigte Degeneration zeigte sich sowohl bei Patienten mit präoperativ bestehender degenerativ bedingter Symptomatik, als auch bei Patienten, die aufgrund einer Traumas operiert wurden (Goffin et al., 2004).

Es ist unbestritten, dass sowohl Anschlussdegeneration, als auch ASD ein weit verbreitetes Phänomen nach operativer Wirbelsäulenversteifung sind, jedoch wird der Auslöser für deren Auftreten nach wie vor kontrovers in der Literatur diskutiert (Hilibrand & Robbins, 2004; Javedan & Dickman, 1999; Maldonado, Paz, & Martin, 2011; Seo & Choi, 2008; Song, Choi, Jeon, Lee, & Chang, 2011).

All diese oben genannten degenerativen Veränderungen können nach operativer Wirbelsäulenversteifung auftreten, sind jedoch auch Teil des natürlichen Alterungsprozesses der Wirbelsäule (Buckwalter, 1995). Eine eindeutige Aussage, ob ASD ein natürliches Krankheitsbild des alten Menschen ist, oder doch hauptsächlich eine Folge von operativer Fusion von Wirbelkörpern, konnte bisher nicht abschließend getroffen werden. Die Tatsache, dass überwiegend alte Menschen die Wirbelsäule operativ versteift bekommen, erschwert die Beantwortung der Frage zusätzlich.

2.4. Operative Therapie

Für die Indikationsstellung zur operativen Therapie bei Pathologien der HWS spielt die klinische Symptomatik eine große Rolle. Höhergradige Paresen oder eine akute Querschnittssymptomatik bedeuten eine Notfallindikation zur sofortigen Operation (A. König & Spetzger, 2014). Häufiger sind jedoch Zervikobrachialgien, Hyp- und Parästhesien, sowie latente Paresen, welche elektiv operativ versorgt werden können (Edwards, Riew, Anderson, Hilibrand, & Vaccaro, 2003).

ACDF und ACCF, gegebenenfalls mit ventraler Plattenosteosynthese, sind die Verfahren, die heutzutage bei der operativen Versteifung der HWS überwiegend zur Anwendung kommen.

2.4.1. OP-Technik (ACDF und ACCF)

Bei zervikaler Radikulopathie und Myelopathie erfolgt die Dekompression über einen anterolateralen Zugangsweg, da das Rückenmark meist von ventral durch die Bandscheiben, das Ligamentum longitudinale posterius oder Osteophyten der Wirbelkörper komprimiert wird (A. König & Spetzger, 2014). Erstreckt sich die Spinalkanalstenose über mehrere Segmente und geht nicht nur von den Bandscheiben, sondern auch von der Rückseite der Wirbelkörper aus, ist eine Korpektomie (ACCF) indiziert (S. A. König, Ranguis, & Spetzger, 2015; Medow, Trost, & Sandin, 2006). Neben der Dekompression, ist vor allem auch die Wiederherstellung der sagittalen Balance und der natürlichen HWS-Lordose ein operatives Ziel. Dies wird z.B. durch lordotisch geformte Cages und lordotische ventrale Platten erreicht (A. König & Spetzger, 2014; S. B. Park, Jahng, & Chung, 2012).

Zum einen ist der anteriore Zugang sinnvoll, da die Kompression des Myelons meist von ventral ausgeht, zum anderen scheint er auch biomechanisch Vorteile für den postoperativen Verlauf zu haben. So zeigte eine Studie, dass die Range-of-Motion sowie die Belastung für Bandscheiben und Facettengelenke der benachbarten Segmente nach anteriorer Fusion niedriger sind, als nach posteriorer oder kombinierter Fusion (Hussain, Nassr, Natarajan, An, & Andersson, 2013).

Wie oben bereits beschrieben (siehe 2.4.4 Anschlussdegeneration), werden diese Faktoren mitverantwortlich gemacht für das Auftreten von Anschlussdegeneration nach operativer Fusion (Kepler & Hilibrand, 2012).

Operiert wird in Rückenlage mit rekliniertem Kopf und der Hautschnitt erfolgt auf Höhe des betroffenen Segments. Nach Präparation und Inzision des Platysmas wird die obere Halsfaszie dargestellt und medial vom Musculus sternocleidomastoideus durchtrennt. Es folgt die stumpfe Präparation mit Aufsuchen der Arteria carotis communis. Das gesamte Gefäß-Nerven-Bündel des Halses wird lateralisiert, Schilddrüse, Trachea und Ösophagus werden medialisiert. Anschließend wird die prävertebrale Faszie dargestellt und inzidiert, wodurch der Musculus (M.) longus colli und das Ligamentum longitudinale anterior sichtbar werden. Die Ansätze des M. longus colli werden abgetrennt und Caspar-Schrauben (Caspar, Barbier, & Klara, 1989) werden in die benachbarten Wirbelkörper des beteiligten Segments eingebracht. Durch Distraction wird das Ligamentum longitudinale anterior

aufgespannt, wodurch es inzidiert und abgetragen werden kann. Das darunterliegende Bandscheibenfach wird inzidiert und ausgeräumt (sog. Diskektomie). Je nach Pathologie werden zusätzlich Osteophyten abgetragen, die den Spinalkanal oder das Neuroforamen komprimieren (Abbildung 5). Anschließend wird die entfernte Bandscheibe mit einem Cage, welcher in der Regel aus einer Titanlegierung oder Polyetheretherketon (PEEK) besteht, ersetzt. (A. König & Spetzger, 2014).



Abbildung 5: Diskektomie mit scharfem Löffel (A. König & Spetzger, 2014)

2.4.2. Ventrale Plattenosteosynthese

Zur Stabilisierung und Fixierung kann nach operativ erfolgter Fusion zusätzlich eine ventrale Verplattung der betroffenen Segmente durchgeführt werden.

Dabei hat man die Wahl zwischen einer stabilen und einer dynamischen Verplattung. Welches System man nimmt, hängt von der zugrundeliegenden Pathologie ab. Bei traumatischen Verletzungen ist die Stabilität oft entscheidend, wohingegen die dynamische Verplattung Mikrobewegungen ermöglicht, welche eine schnellere Fusion der operierten Wirbelkörper herbeiführen soll.

Unter Röntgenkontrolle werden intraoperativ Platte und Schrauben optimal an die individuelle HWS-Lordose angepasst und der korrekte Sitz wird überprüft (A. König & Spetzger, 2014).

In Abbildung 6 ist links das präoperative seitliche Röntgenbild eines Patienten mit degenerativer zervikaler Kyphose zu sehen. Das rechte Bild zeigt den Zustand nach 4-Level ACDF mit PEEK-Cages und anschließender ventraler Verplattung.

Intraoperativ wurde die physiologische HWS-Lordose wiederhergestellt und die Platte wurde optimal an die Krümmung der Halswirbelsäule angepasst.



Abbildung 6: 4-Level ACDF mit ventraler Plattenosteosynthese (Deutsch et al., 2003)

3. Zielsetzung der Arbeit

3.1. Fragestellung und Ziele

Myelopathische Beschwerden der Halswirbelsäule sind ein sehr weit verbreitetes Problem in unserer älter werdenden Gesellschaft und stellen auch wirtschaftlich gesehen einen enormen Kostenfaktor für unsere Gesundheitssysteme dar (Global Burden of Disease Study, 2015; Henschke, Kamper, & Maher, 2015; Safiri et al., 2020).

ACDF und ACCF haben sich als effektive Verfahren etabliert, um die Beschwerden und Schmerzen der Patienten zu lindern. Durch die operative Fusion kommt es jedoch auch zu einer Störung der Biomechanik der Halswirbelsäule. Das operierte Segment wird versteift, wodurch die Beweglichkeit in den anschließenden Segmenten kompensatorisch zunimmt und die Belastung auf die benachbarten Wirbelkörper, Bandscheiben und Gelenke steigt. Dies kann zu einer beschleunigten Degeneration der kranial und kaudal anschließenden Segmente führen.

Spricht man von der Biomechanik der HWS, spricht man auch von ihrer sagittalen Balance. Fehlstellungen führen zu Fehlbelastungen und können letztendlich weitere Beschwerden verursachen (Patwardhan et al., 2018).

Die sagittale Balance ist essenziell für die Biomechanik und Funktion der Halswirbelsäule.

Nach ACDF und ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese wird idealerweise die sagittale Balance der HWS wiederhergestellt. Die ventrale Verplattung bringt Stabilität und sorgt dafür, dass die Lordose im postoperativen Verlauf erhalten bleibt und weniger sekundäre Cagesinterungen auftreten.

Einige Studien haben sich bereits mit der Frage beschäftigt, ob die sagittale Balance einen Einfluss auf die Entstehung von Anschlussdegenerationen nach operativer Fusion der Lendenwirbelsäule hat. Sie alle kommen zu dem Schluss, dass eine postoperative LWS- und Becken-Fehlstellung die Degeneration der anschließenden Segmente sowie das Auftreten von ASD begünstigen (Djurasovic et al., 2008; Kumar, Baklanov, & Chopin, 2001; P. Park, Garton, Gala, Hoff, & McGillicuddy, 2004; Rahm & Hall, 1996).

Für die Halswirbelsäule wurden bisher wenige Studien zu diesem Thema durchgeführt und es existieren kaum Daten (Villavicencio et al., 2011).

Basierend auf diesen Grundlagen stellt sich die Frage, ob auch die sagittale Balance der Halswirbelsäule nach zervikaler Fusion einen Einfluss auf das Auftreten einer symptomatischen Anschlussdegeneration hat.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu analysieren, ob präoperative sagittale Balance Parameter der HWS eine prognostische Aussagekraft im Hinblick auf das postoperative Outcome nach zervikaler Fusion und auf Revisionsraten aufgrund von ASD haben.

Die Parameter der sagittalen Balance wurden prä- und postoperativ im Verlauf nach ACDF und ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese erhoben. Diese wurden über den jeweils vorhandenen Follow-up Zeitraum analysiert und evtl. auftretende Zusammenhänge mit der Rate an Revisionsoperationen (bedingt durch ASD und Anschlussinstabilität) untersucht. Ebenso wurde untersucht, inwieweit andere Parameter (z.B. OP-Dauer, Grad der Facettengelenksdegeneration, Anzahl der betroffenen Höhen, Höhe des operierten Bewegungssegmentes etc.) einen Einfluss auf die Revisionsrate haben. Auch wird der Einfluss der Knochendichte auf die Sinterungstendenz von Cages betrachtet.

3.2. Hypothesen

- Eine Fehlstellung nach operativer Fusion beschleunigt die Entstehung einer symptomatischen Anschlussdegeneration und erhöht so das Risiko einer ASD-bedingten Revisionsoperation
- Eine präoperativ bereits bestehende sagittale Imbalance geht mit einem erhöhten Risiko für eine Revision einher, weswegen die sagittale Balance bereits präoperativ in die Eingriffsplanung und Indikationsstellung einbezogen werden sollte
- Je stärker die Degeneration der Facettengelenke präoperativ ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für einen ASD-bedingten Revisionseingriff.
- Je länger die Operationsdauer ist, desto größer das Risiko von perioperativen Komplikationen und für Revisionseingriffe.
- Die Wahrscheinlichkeit für einen Revisionseingriff ist größer bei Sekundär- als bei Primäreingriffen.

- Je ausgedehnter die Operation, das heißt je mehr Segmente von der Pathologie betroffen sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Komplikationen und einem damit verbundenen Revisionseingriff.
- Je schlechter der Knochenqualität, bzw. je niedriger die Knochendichte, desto wahrscheinlicher ist die Sinterung der Cages.

4. Material und Methoden

4.1. Patientenkollektiv

Durchgeführt wurde die vorliegende retrospektive Studie mit Patienten, welche mindestens 18 Jahre alt waren und in einem Zeitraum von 7 Jahren zwischen 2010 und 2016 am Neuro-Kopf-Zentrum des Universitätsklinikums rechts der Isar der Technischen Universität München operiert wurden. Alle Patienten unterzogen sich einer ACDF oder ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese. Diagnosen zur Indikationsstellung waren degenerative Spinalkanalstenosen, Diskushernien, degenerative Olisthesis, traumatische und pathologische Wirbelkörperfrakturen, traumatische diskoligamentäre Verletzungen und Spondylodiszitis.

Insgesamt wurden 523 Patienten retrospektiv erfasst. Von der Studie ausgeschlossen wurden 368 Patienten, bei denen die Daten nur unvollständig erhoben werden konnten. Gründe dafür waren zum Beispiel eine schlechte Qualität der radiologischen Bildgebung oder ein lost to follow-up, wenn die Patienten nach erfolgter Operation nicht mehr zur Nachkontrolle erschienen.

Somit wurden 155 Patienten eingeschlossen. Von den 155 eingeschlossenen Patienten waren 86 (55%) männlich und 69 (45%) weiblich. Das Durchschnittsalter der Patienten lag zum Zeitpunkt der Operation bei $68,8 \pm 14$ Jahren (24-99).

4.2. Datenerhebung

Die Daten wurden anhand der radiologischen Bildgebung der Patienten erhoben. Als Grundlage dienten zum einen die im klinikinternen SAP-System gespeicherten Patienteninformationen und Arztbriefe, zum anderen die im PACS-System archivierten Röntgenbilder, sowie CT- und MRT-Bilder der Halswirbelsäule. Die Bilder wurden für jeden Patienten an drei verschiedenen Zeitpunkten angefertigt: präoperativ, postoperativ und bei einem späteren Kontrolltermin zum follow-up. Es wurden sowohl allgemeine Daten zu den Patienten und zur Operation erhoben, als auch spezifische, vorher definierte Parameter zur Bestimmung der sagittalen Balance an den Bildern vermessen und in eine Tabelle übertragen.

Die Messwerte in der Tabelle sind somit in drei Gruppen unterteilt, „präoperativ“, „postoperativ“ und „follow-up“. Zu jedem der drei Zeitpunkte wurden dieselben Parameter vermessen.

4.3. Datenschutz

Vermessen wurden die Patientenbilder an einem Computer des Klinikums rechts der Isar, dessen Zugriff beschränkt ist. Außenstehende haben somit keinen Zugriff auf die Bilder. Die gemessenen Werte wurden in eine passwortgesicherte Datenbank eingetragen. Das Passwort ist nur Mitarbeitern der Studie bekannt.

Die Datenbank ist auf keinem der Rechner gespeichert und kann somit auch nicht entwendet werden.

4.4. Ethische Aspekte

Die Studie ist retrospektiv angelegt, weswegen alle patientenbezogenen Daten und Bilder bereits während des stationären Aufenthaltes oder im Zuge der regulären Nachkontrollen erhoben wurden. Somit ergibt sich keine negative Beeinflussung der Patienten. Auch werden keine weiteren Bildgebungen und Untersuchungen für diese Studie vorgenommen.

Einzig das Risiko des Bekanntwerdens der Patientendaten besteht, jedoch wird dieses durch die oben erwähnten Zugriffsbeschränkungen minimiert.

4.5. Allgemeine Daten

Neben demografischen Daten wurden auch Daten zur Operation erhoben wie Indikation, Primär- oder Revisionseingriff, Operationsdauer, das Ausmaß des Eingriffs, Anzahl der operierten Segmente und Anzahl der implantierten Cages. Patienten wurden bis Dezember 2020 nachverfolgt in Bezug auf postoperative Komplikationen, Revisionseingriffe und Gründe für eine Revision, wie z.B. ASD, Anschlussinstabilität, Implantatlockerung oder Implantatversagen.

4.6. Radiologische Messwerte

Ausgemessen werden die Parameter an seitlichen Röntgenbildern der zervikalen Wirbelsäule sowie MRT- und CT-Bildgebung. Die Bildgebung erfolgte im Rahmen der Standard-Diagnostik zur Planung des operativen Eingriffs und zur Verlaufskontrolle. Messungen wurden mit der PACS Software an Rechnern des Universitätsklinikums rechts der Isar durchgeführt.

4.6.1. Präoperative Bildgebung

Zur präoperativen Diagnostik wurden Röntgenbilder der HWS in zwei Ebenen angefertigt (seitliche Aufnahme siehe Abbildung 7A), sowie ein MRT und/oder CT.

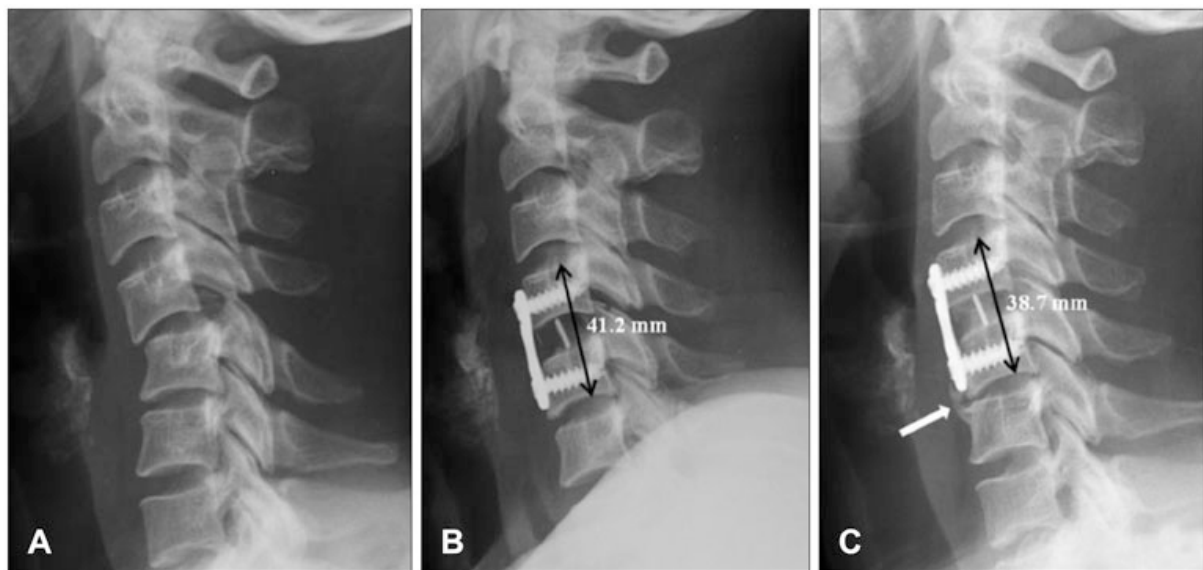


Abbildung 7: Röntgenstudie einer ACDF mit ventraler Verplattung von C4 - C5

(A) Seitliche Aufnahme der HWS mit Olisthesis C4/C5. (B) Unmittelbar postoperative Aufnahme nach erfolgreicher ACDF mit ventraler Verplattung. (C) Verlaufskontrolle 27 Monate postoperativ zeigt Fusion der Segmente C4 und C5. Jedoch kam es zu einer leichten Sinterung, sowie einer Degeneration des anschließenden Segmentes (weißer Pfeil). (Han et al., 2018)

4.6.1.1. Knochendichte-Messung

Je nach Gewebetyp und Gewebebeschaffenheit wird Röntgenstrahlung im Körper unterschiedlich stark abgeschwächt. Die Hounsfield-Skala beschreibt diese

Abschwächung im Gewebe und stellt sie in Graustufenbildern dar. Je dichter ein Gewebe ist, desto stärker wird die Röntgenstrahlung abgeschwächt und desto höher ist der Hounsfield-Units-Wert (HU). So hat Luft einen Wert von -1000 HU, da sie annähernd keine Röntgenstrahlung absorbiert. Knochen kommt je nach Dichte auf Werte über 1000 HU (DenOtter & Schubert, 2021). Je dichter der Knochen, desto Größer der HU-Wert.

Zur Bestimmung der Knochendichte wurde zunächst der HU-Wert der einzelnen Halswirbelkörper C2 bis C7 ermittelt. Werden die HU-Werte an verschiedenen CT-Geräten gemessen, so lassen sich diese untereinander nicht vergleichen, da die Geräte unterschiedliche Auflösungen haben. Mithilfe individueller Hersteller-Formeln für die einzelnen Geräte wurden die HU-Werte nachträglich in Knochendichte in mg/ml (BMD) umgerechnet um die an unterschiedlichen CT-Geräten ermittelten BMD-Werte miteinander vergleichbar zu machen.

4.6.1.2. Degeneration der Facettengelenke

Die Klassifikation nach Kellgren und Lawrence 1952 (Kellgren & Lawrence, 1952) unterscheidet 5 Schweregrade der Degeneration (Abbildung 8):

Grad 0: keine Arthrosezeichen im Röntgenbild.

Grad 1: Minimale Veränderungen.

Grad 2: Geringe Arthrosezeichen (zunächst Gelenkspaltverschmälerung und Osteophyten, später auch subchondrale Sklerosierung oder Zysten).

Grad 3: Moderate Arthrosezeichen.

Grad 4: Schwere Arthrose und starke Degeneration (Kellgren & Lawrence, 1957).

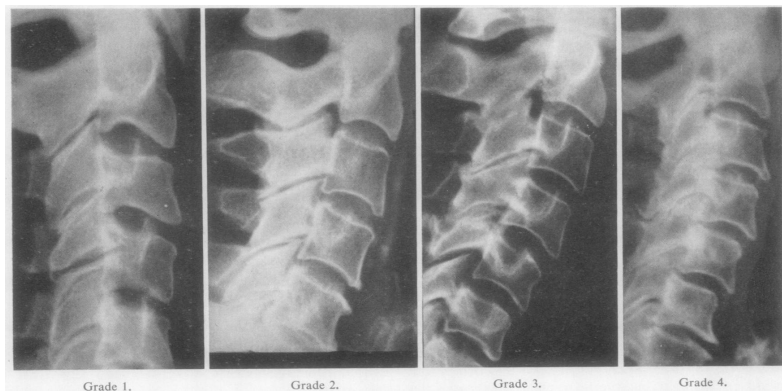


Abbildung 8: Klassifikation der Facettengelenksdegeneration nach Kellgren und Lawrence (Kellgren & Lawrence, 1957)

Weishaupt et al. beschrieben 1999 eine Klassifikation zur Einteilung der Facettengelenksdegeneration an axialen CT- und MRT-Bildern der lumbalen Wirbelsäule (Weishaupt, Zanetti, Boos, & Hodler, 1999).

Sie unterscheiden vier verschiedene Stadien (Abbildung 9):

Grad 0: Facettengelenk intakt, ohne Anzeichen von Degeneration und mit einer normalen Weite des Gelenkspaltes (2-4 mm).

Grad 1: Gelenkspaltverschmälerung (<2 mm) und/oder kleine Osteophyten und/oder einer geringen Hypertrophie des Processus articularis.

Grad 2: Moderate Arthrosezeichen und/oder beginnende Degeneration des subchondralen Knochens.

Grad 3: Stark ausgeprägte Arthrose der Facettengelenke mit Aufhebung des Gelenkspaltes, großen Osteophyten, starker Hypertrophie des Processus articularis, Degeneration des subchondralen Knochens und Zystenbildung.

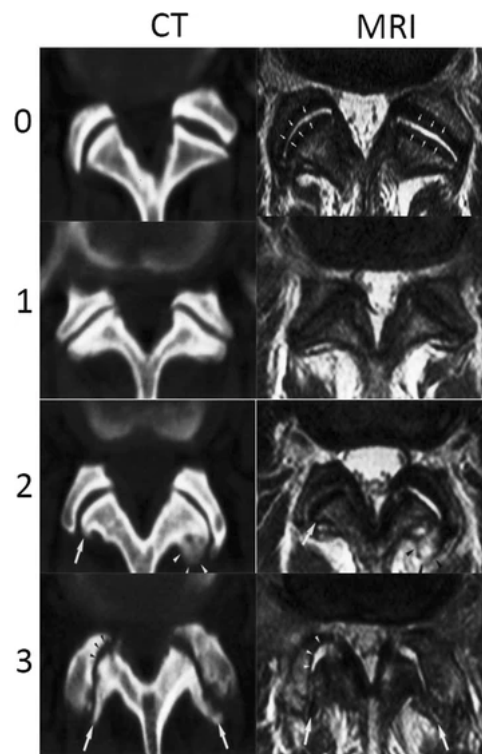


Abbildung 9: Weishaupt Klassifikation der Facettengelenksdegeneration (Weishaupt et al., 1999)

In dieser Studie wurde die Facettengelenksdegeneration der Patienten wie bei Kellgren und Lawrence an lateralen Röntgenbildern der HWS beurteilt. Die Einteilung erfolgte jedoch wie bei Weishaupt et al in vier verschiedene Schweregrade: Grad 0 = keine Degeneration, Grad 1 = leichte Veränderungen, Grad 2 = moderate Arthrose und Grad 3 = schwere Arthrose (Weishaupt et al., 1999).

4.6.2. Postoperative Bildgebung

Alle Patienten erhielten standardmäßig eine postoperative Röntgenbildgebung der HWS in zwei Ebenen zur Stellungskontrolle der eingebrachten Implantate (Abbildung 7B).

4.6.3. Follow-up Bildgebung

Nach ein bis zwei Jahren Follow-up wurde im Rahmen der routinemäßigen Verlaufskontrollen erneut Röntgenaufnahme der HWS angefertigt (Abbildung 7C).

Diese dienen zur Beurteilung einer möglichen Dislokation, Lockerung oder Versagen der Implantate, Cagesinterungen, Anschlussdegenerationen oder Anschlussinstabilitäten, sowie der Fusion des operierten Segmentes.

Zur genaueren Bewertung bei fehlender Fusion sind Funktionsaufnahmen der HWS hilfreich (Abbildung 10). Kommt es zu einer Zunahme des Abstands von $\geq 2\text{mm}$ zwischen den Dornfortsätzen in Extension und Flexion, so geht man von einer Non-Fusion aus (Kaiser et al., 2009).

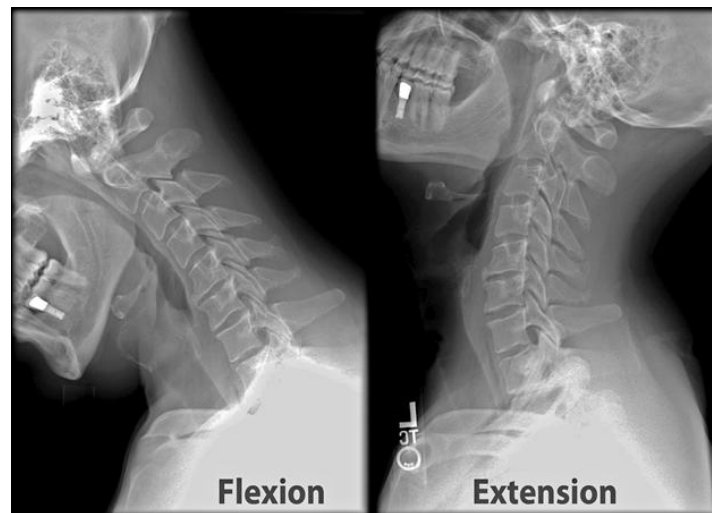


Abbildung 10: Funktionsaufnahmen HWS in Flexion und Extension (Kaiser et al., 2009)

4.6.4. Cage-Sinterung

Postoperativ und bei der Verlaufskontrolle wurde der Abstand zwischen der oberen und unteren Deckplatte der angrenzenden Wirbelkörper gemessen (Abbildung 7B und 7C). Von Sinterung spricht man ab einem Höhenverlust von $\geq 3\text{mm}$, 5mm und 7mm bei einer, zwei oder drei operierten Höhen (Gercek, Arlet, Delisle, & Marchesi, 2003; Karikari et al., 2014).

4.6.5. Parameter der sagittalen Balance

Zur Beurteilung der sagittalen Balance der zervikalen Wirbelsäule werden sieben verschiedene Parameter am seitlichen HWS-Röntgenbild ausgemessen. Der Kopf steht dabei in neutraler Position mit horizontalem Blick (Kwon et al., 2017; Scheer,

Tang, Smith, Acosta, Protopsaltis, Blondel, Bess, Shaffrey, Deviren, Lafage, Schwab, Ames, et al., 2013).

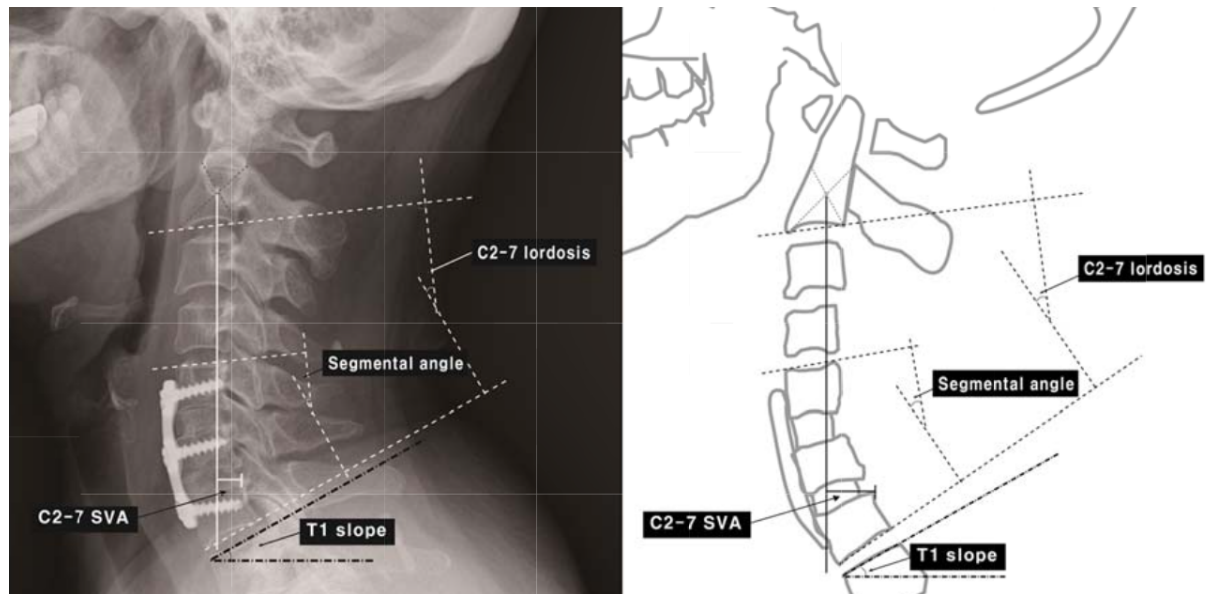


Abbildung 11: Radiologische Parameter der sagittalen Balance (Kwon et al., 2017)

Die Literatur zeigt, dass es bei asymptomatischen Erwachsenen einen sehr weit gefassten Normwertebereich für die Parameter der sagittalen Balance gibt, was vermutlich auf die große Mobilität der HWS zurückzuführen ist (Tabelle 3) (Azimi, Yazdani, Benzel, Hai, & Montazeri, 2021; Bao et al., 2017; Hardacker, Shuford, Capicotto, & Pryor, 1997; Knott et al., 2010; Kuntz, Levin, Ondra, Shaffrey, & Morgan, 2007; Rossanez, de Rezende Pratali, Smith, Nasreddine, & Pereira da Silva Herrero, 2023; Roussouly et al., 2006). Aktuell existiert keine Studie, die den Normwertebereich der K-line bei asymptomatischen Erwachsenen beschreibt. Ebenso lassen sich keine Normwerte für die Segmentale Lordose feststellen, da es sich hier um einen individuellen Parameter handelt.

	CL C2-C7 (°)	T1-Slope (°)	C2 SVA (mm)	C7 SVA (mm)	COG SVA (mm)
(Rossanez et al., 2023)	-15.7±13.7 (-47-29.6)	26.5±7.8 (8.7-41.4)	13.1±10.3 (-12.1-34.7)	-	-

(Hardacker et al., 1997)	-	-	-	16.8±11.2	-
(Roussouly et al., 2006)	-	-	-	-	35.2± 19.4 (-18.1-80.8)
(Azimi et al., 2021)	-	24.5±0.98	18.7±1.76	-	-
(Kuntz et al., 2007)	17.0±14.3	-	-	-	-
(Bao et al., 2017)	-	-	24.4±11.6	-	-

Tabelle 3: Normwertbereiche der Parameter der zervikalen sagittalen Balance

Im Folgenden werden nun die gemessenen Parameter erklärt:

- (1) Cobb-Line C2-C7 (CL C2-C7): Der Winkel zwischen einer Linie, die parallel zur Unterkante von HWK 2 und einer Linie, die parallel zur Unterkante von HWK 7 verläuft (Abbildung 11).
- (2) K-line: Die Gerade, welche die Mittelpunkte des Spinalkanals der Höhen HWK2 und C7 verbindet (Abbildung 12, blaue Linie)
- (3) T1-Slope: Der Winkel den eine Gerade entlang der superioren Deckplatte von T1 mit einer horizontalen Referenzlinie bildet (Abbildung 11).
- (4) Segmentale Lordose (Seg C Lordosis): Der Winkel zwischen einer Linie die parallel zur superioren Deckplatte des obersten Wirbelkörpers und einer Linie die parallel zur inferioren Deckplatte des untersten Wirbelkörpers des operierten Segments verläuft (Abbildung 11).
- (5) C2 SVA: Die Distanz in Millimeter zwischen einem Senklot ausgehend von HWK 2 und dem posterioren Ende der superioren Deckplatte von HWK 7. Positives sagittal alignment ist hier definiert als eine anteriore Ausrichtung der HWS (Abbildung 11 und Abbildung 12, roter Pfeil).

- (6) C7 SVA: Die Distanz in Millimeter zwischen einem Senklot ausgehend vom anterioren Tuberculum von HWK1 und dem posterioren Ende der superioren Deckplatte von HWK 7 (Abbildung 12, grüner Pfeil).
- (7) COG SVA: Die Distanz in Millimeter zwischen einem Senklot ausgehend vom anterioren Rand des externen knöchernen Gehörgangs und dem posterioren Ende der superioren Deckplatte von HWK 7 (Abbildung 12, gelber Pfeil).

Die oben genannten Parameter wurden für jeden Patienten zu drei verschiedenen Zeitpunkten erfasst: am präoperativen Röntgenbild, am postoperativen Röntgenbild und schließlich am Follow-up Bild.

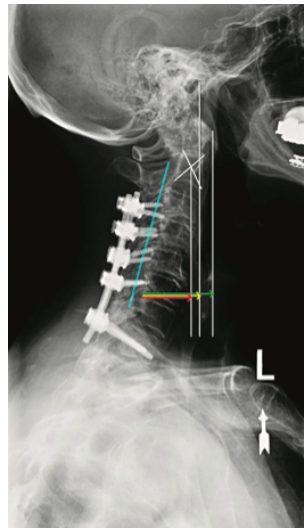


Abbildung 12: Sagittal vertical alignment und k-line (Scheer, Tang, Smith, Acosta, Protosaltis, Blondel, Bess, Shaffrey, Deviren, Lafage, Schwab, Ames, et al., 2013)

Vermessung von k-line (blaue Linie) und zervikaler sagittaler Axis am lateralen Röntgenbild der HWS. Der rote Pfeil repräsentiert C2 SVA, der gelbe Pfeil COG SVA und der grüne Pfeil C7 SVA

4.7. Statistische Methoden

Die Datenerfassung und Textverarbeitung erfolgte mit Hilfe der Arbeitsprogramme Microsoft Word (Version 16.55 für Macintosh) und Microsoft Excel (Version 16.56 für Macintosh). Die Analyse der Daten wurde mit IBM SPSS Statistics für Macintosh, Version 27.0 durchgeführt (IBM Corp. Released 2020. Armonk, NY: IBM Corp).

Bei der multivariaten Analyse der Daten fand zum großen Teil die binär logistische Regressionsanalyse Anwendung.

Eine Korrelation der einzelnen Parameter der sagittalen Balance untereinander wurde außerdem mittels Korrelationsanalyse nach Pearson, sowie mit einem linearen Regressionsmodell analysiert.

Mittels Shapiro-Wilk-Test wurden die Parameter der sagittalen Balance dahingehend untersucht, ob die verschiedenen Wertegruppen zu allen drei Zeitpunkten Normalverteilt sind. Für die Parameter, welche präoperativ, postoperativ und zum follow-up normalverteilt waren (CL C2-C7, T1-slope, Seg C Lordosis), wurde eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) mit Messwiederholung durchgeführt um aufzuzeigen, bei welchen dieser Parameter es über die drei Untersuchungszeitpunkte hinweg zu einem signifikanten Unterschied im Mittelwert kommt. Mittels Turkey-Test wurde schließlich noch getestet, zwischen welchen Zeitpunkten die signifikanten Unterschiede bestehen. Als Signifikanzgrenze wurden p-Werte von $p \leq 0.05$ festgelegt.

5. Ergebnisse

Insgesamt wurden 523 Patienten retrospektiv erfasst, die von 2010 bis 2016 am Neuro-Kopf-Zentrum des Klinikums rechts der Isar mittels ACDF oder ACCF und ventraler Verplattung operiert wurden. Nur Patienten mit präoperativem CT, sowie präoperativem, postoperativem und Follow-up Röntgen der HWS in 2 Ebenen wurden eingeschlossen. 368 Patienten wurden daher ausgeschlossen, da die radiologische Bildgebung im PACS-System nicht ausreichend war.

Somit wurden 155 Patienten eingeschlossen.

5.1. Verteilung der Basischarakteristika

Von den 155 eingeschlossenen Patienten waren 86 (55%) männlich und 69 (45%) weiblich. Das Durchschnittsalter der Patienten lag zum Zeitpunkt der Operation bei $68,8 \pm 14$ Jahren (24-99). Präoperativ wurde der Zustand der Facettengelenke beurteilt. Bei 73 Patienten (47%) lag keine Degeneration der Facettengelenke vor. 56 Patienten (36%) wiesen eine geringe, 24 Patienten (16%) eine mäßige und 2 Patienten (1%) eine schwere Facettengelenksdegeneration auf. Alle Patienten erhielten eine Röntgenbildgebung der HWS in 2 Ebenen präoperativ, postoperativ und zu einem vorher nicht festgelegten follow-up Termin. Dieser Termin fand im Durchschnitt $15 \pm 9,76$ Monate (1-45) postoperativ statt. Alle Patienten wurden bis Dezember 2020 nachverfolgt hinsichtlich einer möglichen Revisionsoperation. Bis zum 31.12.2020 wurden 26 Patienten (17%) erneut an der HWS operiert. Von den Revisionsoperationen waren 14 Operationen (9%) am benachbarten kranialen Segment, 9 Operationen (5,8%) auf der operierten Indexhöhe und 3 Operationen am benachbarten kaudalen Segment (1,9%). Gründe für eine Revision waren: ASD bei 17 Patienten (11%), davon 14 Patienten (9%) am kranialen Nachbarsegment und 3 (1,9%) am kaudalen Nachbarsegment (Tabelle 4), 6 Patienten (3,9%) mit Implantat-Versagen (Schraubenlockerung oder Fehllage der Schrauben), je 1 Patient (0,6%) mit akuter interventionsbedürftige Nachblutung, zusätzlicher dorsaler Stabilisierung über die operierten Höhen (Pedikelschrauben) und Sinterung des Cages. Insgesamt ließ sich über den beobachteten Zeitraum lediglich bei einem Patienten eine klinisch relevante Cage-Sinterung beobachten.

Von den Patienten, die postoperativ eine revisionsbedürftige ASD entwickelten, trat diese häufiger kranial (14 Patienten (82,4%)) als kaudal (3 Patienten (17,6%)) auf ($p = 0.013$). Die Revisions-OP erfolgte im Mittel $31,9 \pm 15,01$ Monaten (10-57) nach der ersten Operation. Bei kranialer ASD erfolgte die Revisions-OP nach $32,2 \pm 14,23$ Monaten (10-57), bei kaudaler nach $30,3 \pm 21,94$ Monaten (13-55) (Tabelle 4). Es gab keinen signifikanten Unterschied im Hinblick auf den Zeitpunkt der Re-Operation zwischen den beiden Gruppen ($p=0,425$).

Nach 12 Monaten lag die Re-Operationsrate aufgrund von ASD bei 1,3%, nach 24 Monaten bei 4,5%, nach 36 Monaten bei 6,5%, nach 48 Monaten bei 9,7% und nach 60 Monaten bei 11% . Bei einer durchschnittlichen Revisionsrate von $2,2 \pm 0,84\%$ (1,36-3,04) pro Jahr ergibt das kumulativ auf 10 Jahre gesehen eine Re-Operationsrate von ca. 20%.

Revisionsoperationen	Indexhöhe (1. OP)	Knochendichte (mg/mL)	Höhe der 2. OP	ASD	Zeit bis zur Re- Operation (Monate)
OP 1	HW6/7	234.4	HW5/6	kranial	20
OP 2	HW6/7	240.6	HW5/6	kranial	47
OP 3	HW3-6	257.2	HW2/3	kranial	10
OP 4	HW3-5	142.1	HW5/6	kaudal	55
OP 5	HW4-7	223.7	HW3/4	kranial	17
OP 6	HW3-5	195.3	HW2/3	kranial	41
OP 7	HW4-7	223.1	HW3/4	kranial	41
OP 8	HW4-7	221.5	HW3/4	kranial	11
OP 9	HW4-6	198.4	HW3/4	kranial	33
OP 10	HW4-6	206.5	HW6/7	kaudal	23
OP 11	HW4-7	189.7	HW3/4	kranial	57
OP 12	HW6/7	278.0	HW5/6	kranial	24
OP 13	HW3-7	253.9	HW2/3	kranial	42
OP 14	HW4/5	239.3	HW5/6	kaudal	13
OP 15	HW4-6	211.5	HW3/4	kranial	35
OP 16	HW4-7	194.4	HW3/4	kranial	29
OP 17	HW4-7	199.8	HW3/4	kranial	44

Tabelle 4: Revisionsoperationen bei ASD

5.2. Allgemeine Operationsdaten

Operiert wurden 80 Patienten (52%) aufgrund einer degenerativen zervikalen Myelopathie, 22 Patienten (14%) aufgrund einer traumatischen Fraktur oder diskoligamentären Verletzung, 22 Patienten (14%) bei degenerativer Listhesis, 12 Patienten (8%) bei Diskushernie, 7 Patienten (5%) mit Foramenstenose, 6 Patienten (4%) mit Spondylodiszitis, 3 Patienten (ca. 2%) mit pathologischer Fraktur und 3 Patienten (ca. 2%) mit einer Tumor-/Metastase-bedingten Myelopathie.

137 Patienten (88%) erhielten eine ACDF, 17 (11%) eine ACCF, 1 Patient (1%) erhielt eine Kombination aus ACDF und ACCF. Von den 17 Patienten mit ACCF wurde lediglich ein Patient im weiteren Verlauf erneut operiert.

121 Operationen (78%) waren Primäringriffe, 34 (22%) Revisionseingriffe.

38 Patienten (25%) wurde auf einer Höhe operiert, 40 Patienten (26%) über 2 Höhen. Bei 62 Patienten (40%) erstreckte sich der Eingriff über 3 Höhen und 15 Patienten (9%) wurden über 4 Höhen operiert. Dabei erhielten 50 Patienten (32%) einen Cage, 38 Patienten (25%) 2 Cages, 54 Patienten (35%) 3 Cages und 13 Patienten (8%) 4 Cages.

Die durchschnittliche OP-Dauer betrug im Mittel $2,3 \pm 1$ Stunden (0,7-5,8).

5.2.1. Auswertung Allgemeine Operationsdaten

5.2.1.1. Facettengelenksdegeneration

Mit zunehmender Degeneration der Facettengelenke scheint das Risiko für eine Revisionsoperation bedingt durch das Auftreten von ASD und Anschlussinstabilität zu steigen (OR1.466; 95% CI: 0.804 – 2.128; $p=0,258$). Dieses Ergebnis war jedoch nicht signifikant.

5.2.1.2. Knochendichte

In unserer Studienpopulation konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Knochendichte und dem Auftreten einer ASD, oder eines Implantatversagens bzw. einer Implantat-Lockerung nachgewiesen werden (OR1.001; 95% CI: 0.991 – 1.011; $p=0.556$). Die Knochendichte der Patienten ohne Re-Operation betrug $215,6 \pm 33,1$ mg/mL (138-285), die Knochendichte der Patienten mit Re-Operation betrug $218,2 \pm 30,9$ mg/mL (142-278).

5.2.1.3. OP-Dauer

Auch die Operationsdauer hatte keinen Einfluss auf die postoperative Komplikationsrate (OR1.000; 95% CI: 0.999 – 1.001; $p=0,857$).

5.2.1.4. Anzahl operierter Höhen

Ebenso gab es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Anzahl operierter Höhen und der Rate an Reoperationen (OR 0.818; 95% CI: 0.804 – 2.128; $p=0,258$).

5.2.1.5. Erst- bzw. Revisionseingriff

Bei der Analyse von Primär-OPs und Revisionseingriffen stieg das Risiko für eine weitere Re-Operation bei Revisionseingriffen im Vergleich zu Ersteingriffen um das 1,14-fache (OR 1,14; 95% CI: 0.173 – 1.463; $p = 0.543$). Dieses Ergebnis war nicht signifikant.

5.3. Sagittale Balance

5.3.1. Präoperative Bildgebung

Präoperativ zeigte sich, dass fast alle gemessenen Werte auf einem signifikanten Niveau miteinander korrelieren.

Je größer der Lordose-Winkel der HWS (CL C2-C7) ist, desto größer ist der Lordose-Winkel im operierten Segment (Seg C Lordosis) ($p < 0.01$). Auch T1-Slope korreliert positiv mit CL C2-C7. Je stärker die HWS-Lordose, desto größer der T1-Slope ($p < 0.01$).

Es zeigte sich eine negative Korrelation mit CL C2-C7 und Seg C Lordosis. Mit zunehmender Lordose kam es zu einer Abnahme der Abstände in C2 SVA, C7 SVA und COG SVA ($p < 0.01$).

Untereinander korrelieren C2 SVA, C7 SVA und COG SVA stark positiv miteinander. Alle beschriebenen Korrelationen waren hoch signifikant ($p < 0.01$).

T1-Slope und die Parameter der sagittalen vertikalen Axis korrelierten positiv miteinander, jedoch auf einem schwächeren Signifikanzniveau ($p < 0.05$).

Für den Parameter K-Line zeigt sich ein positiver Zusammenhang mit C7 SVA ($p = 0.02$).

Für keinen der sieben Parameter konnte ein signifikanter Zusammenhang zum Auftreten von ASD und Anschlussinstabilität und einer damit einhergehenden Revision festgestellt werden.

Für T1-Slope ergab sich eine Odds-Ratio von 0.920 (95% CI: 0.830 – 1.010). Nimmt T1-slope um einen Grad ($^{\circ}$) zu, nimmt das Risiko für das Auftreten von ASD und

Anschlussinstabilität und einer Revisionsoperation ab. Mit $p = 0.067$ wird das festgelegte Signifikanzniveau jedoch verfehlt.

5.3.2. Postoperative Bildgebung

Je größer der Lordosewinkel der HWS postoperativ (CL C2-C7), umso größer war der Lordosewinkel ($p < 0.01$) im operierten Segment und desto größer fiel auch der T1-Slope aus ($p < 0.01$).

Wie präoperativ zeigte sich eine negative Korrelation zwischen CL C2-C7 und C7 SVA bzw. COG SVA ($p < 0.01$). Mit zunehmender HWS-Lordose kam es zu einer Abnahme der dort gemessenen Abstände. Für CL C2-C7 und C2 SVA ergab sich auch eine negative Korrelation, jedoch war diese nicht signifikant ($p = 0.114$).

Die Parameter der sagittalen vertikalen Axis korrelieren nach wie vor stark positiv untereinander ($p < 0.01$) und postoperativ auch mit dem T1-Slope ($p < 0.01$).

Je größer T1-slope, desto größer die SVA-Abstände.

Für die K-Line zeigt sich postoperativ erneut kein signifikanter Zusammenhang zur Segmentlordose ($p = 0.535$), der CL C2-C7 ($p = 0.807$) oder dem T1-Slope ($p = 0.625$). Eine postoperative Zunahme der K-Line korreliert jedoch mit einer Zunahme der SVA ($p < 0.01$).

Für keinen der Parameter konnte ein signifikanter Zusammenhang zum Auftreten von ASD und Anschlussinstabilität und einer damit einhergehenden Revision festgestellt werden. Mit $p = 0.063$ verfehlt der Parameter Seg C Lordosis hier nur knapp die Signifikanz (OR 1.074; 95% CI: 0.998 - 1.150). Für C2 SVA lag die OR bei 1.169 (95% CI: 0.975 - 1.363; $p=0.115$). Nimmt die C2 SVA um 1 mm zu, steigt das Risiko für eine Re-Operation, bedingt durch ASD oder Anschlussinstabilität, um das 1,169-fache. Diese Ergebnisse waren jedoch nicht signifikant.

5.3.3. Veränderung der Parameter im Verlauf

Um grundlegend zu untersuchen, inwieweit sich die Parameter der sagittalen Balance über die drei Zeitpunkte „Präoperativ“, „Postoperativ“ und „Follow-up“ entwickeln und verändern, wurde eine MANOVA Messreihe durchgeführt.

5.3.3.1. Test auf Normalverteilung

Grundvoraussetzung für die Durchführbarkeit der MANOVA Messreihe ist, dass die untersuchten Parameter zu jedem der drei Zeitpunkte einer Normalverteilung unterliegen. Der Shapiro-Wilk-Test zeigt, dass die gemessenen Werte für die Parameter CL C2-C7, Seg C Lordosis und T1-Slope sowohl präoperativ, als auch postoperativ und zum Follow-up normalverteilt sind. Ein Signifikanzwert von $p < 0.05$ bedeutet, dass die Nullhypothese (die Daten sind normalverteilt) abgelehnt wird und die Daten somit nicht normalverteilt sind. Dies trifft postoperativ auf die Parameter K-Line, C2 SVA, C7 SVA und COG SVA zu.

5.3.3.2. MANOVA Messreihe

Die drei normalverteilten Parameter CL C2-C7, Seg C Lordosis und T1-slope wurden mittels MANOVA Messreihe untersucht. Für die Messreihe ergab sich ein Signifikanzniveau von $F(3, 416) = 7.8$, $p < .001$.

Bei allen drei Parametern ließ sich jeweils über die drei Messzeitpunkte eine signifikante Veränderung im Mittelwert feststellen. Für CL C2-C7 und T1-Slope mit $p < 0.01$ und für Seg C Lordosis mit $p < 0.001$.

Für CL C2-C7 lag der Mittelwert präoperativ bei $5.79^\circ \pm 14.36^\circ$ Lordose ($R = -28.3^\circ - 52.4^\circ$) postoperativ nahm dieser erwartungsgemäß sig. zu auf $12.37^\circ \pm 12.06^\circ$ ($R = -22.6^\circ - 46.8^\circ$) und zum Follow-up wieder nicht signifikant ab $10.58^\circ \pm 14.21^\circ$ ($R = -25.9^\circ - 55.3^\circ$) (Abbildung 13).

Von Präoperativ zu Postoperativ nahm die Lordose im Mittel um 7.57° (95% CI: $3.67^\circ - 11.46^\circ$; $p < 0.001$) zu; von postoperativ bis zum Follow-up kam es zu einer nicht signifikanten Abnahme der Lordose (-2.15° (95% CI: $-5.99^\circ - 1.69^\circ$; $p = 0.39$)).

Der T1-slope betrug präoperativ $28.64^\circ \pm 10.13^\circ$ ($R = 2.1^\circ - 62.4^\circ$), postoperativ $32.99^\circ \pm 8.76^\circ$ ($R = 1.7^\circ - 53.1^\circ$) und blieb zum Follow-up mit $32.13^\circ \pm 9.69^\circ$ ($R = 3.4^\circ - 54.6^\circ$) unverändert (Abbildung 13). Direkt postoperativ zeigte sich eine signifikante Zunahme um 4.73° (95% CI: $1.98^\circ - 7.48^\circ$; $p < 0.001$). Der T1-Slope nahm im postoperativen Verlauf wie die HWS-Lordose nicht signifikant um -0.98° (95% CI: $-3.69^\circ - 1.74^\circ$; $p = 0.67$) ab.

Die segmentale Lordose im operierten Segment, Seg C Lordosis, lag präoperativ im Mittel bei $0.20^\circ \pm 10.97^\circ$ ($R = -26.2^\circ - 27.6^\circ$), postoperativ bei $8.72^\circ \pm 9.07^\circ$ ($R = -19.2^\circ - 38.9^\circ$) und zum Follow-up bei $5.49^\circ \pm 10.48^\circ$ ($R = -30.1^\circ - 34.2^\circ$) (Abbildung 13).

Postoperativ nahm die Segment-Lordose somit signifikant um 9.37° (95% CI: 6.47 – 12.27; $p < 0.001$) zu, aber nahm im Follow-up wieder signifikant ab um -3.55° (95% CI: -6.44 – -0.69; $p < 0.05$) (Abbildung 13).

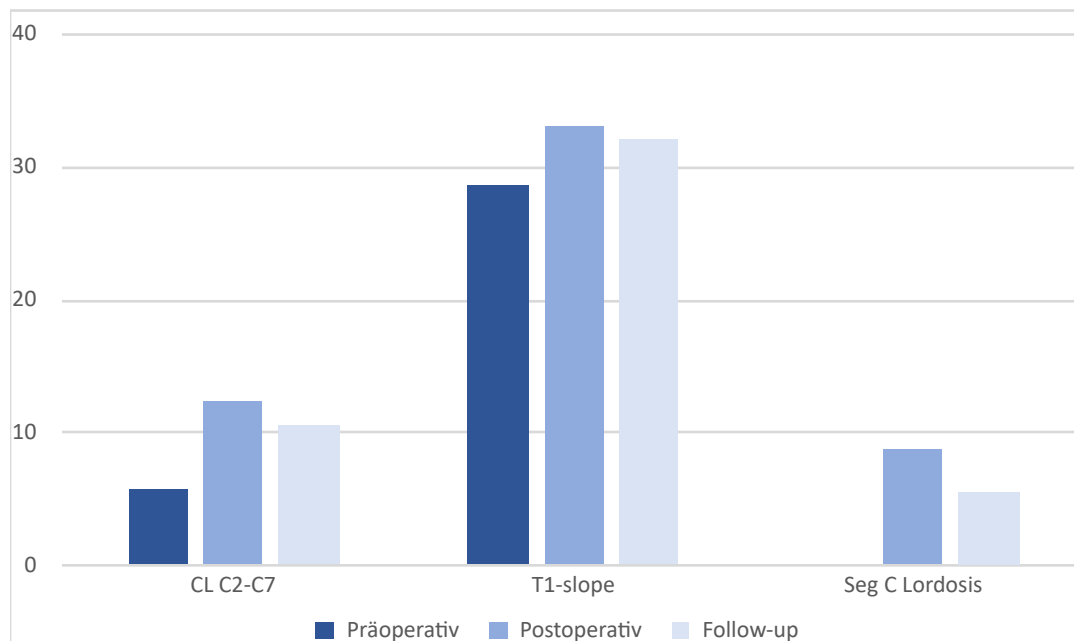


Abbildung 13: Veränderung der Mittelwerte von CL C2-C7, T1-slope und Seg C Lordosis im Verlauf (y-Achse = Winkel in $^\circ$)

6. Diskussion

Ziel dieser Studie war es, den Zusammenhang zwischen der sagittalen Balance der Halswirbelsäule und der Rate an ASD-bedingten Revisionen nach ACDF und ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Parameter der sagittalen Balance untereinander korrelieren und sich die zervikale Balance durch die Fusion verbessert hat. Es gibt gewisse nicht signifikante Korrelationen zwischen einzelnen Parametern und dem Risiko für einen Revisionseingriff, jedoch war keiner der Zusammenhänge signifikant. Die Biomechanik und Funktion der Wirbelsäule hängt eng mit der sagittalen Balance zusammen (Patwardhan et al., 2018). Verschiedene Studien haben sich bereits mit der sagittalen Balance und dem Auftreten von ASD nach Fusion der Lendenwirbelsäule beschäftigt und kommen zu dem Schluss, dass hier eine postoperative sagittale Imbalance vermehrt mit symptomatischer Anschlussdegeneration einhergeht (Djurasovic et al., 2008; Kumar et al., 2001; P. Park et al., 2004; Rahm & Hall, 1996). Daraus ergibt sich die Frage, ob die sagittale Balance nach HWS-Fusion einen Einfluss auf das Auftreten von ASD und das Risiko ASD-bedingter Revisionseingriffe hat.

In einer retrospektive Studie mit 42 Patienten nach ACDF entwickelten 50% der Patienten (21/42) eine Anschlussdegeneration, 9 dieser Patienten (42,8%) wiesen postoperativ eine physiologische HWS-Lordose auf. Bei den 21 Patienten ohne Anschlussdegeneration lag der Anteil physiologischer Lordosen bei 85,7% (18/21; $p = 0.0148$). Eine postoperative Fehlstellung der HWS scheint demnach das Auftreten von ASD zu begünstigen (Katsuura, Hukuda, Saruhashi, & Mori, 2001).

Versuche an lebenden Schafen, von denen ein Teil eine chirurgische Exposition der Wirbelsäule, eine zweite Gruppe eine Fusion und eine dritte Gruppe eine Fusion mit kyphotischer Fehlstellung der Lendenwirbelsäule erhielt, konnte zeigen, dass die dritte Gruppe postoperativ eine ASD entwickelten (Oda et al., 1999). Neben dem Lordose-Winkel gibt es weitere Parameter, die man zur Bestimmung der sagittalen Balance der Wirbelsäule heranziehen kann (siehe 4.6.5 Parameter der sagittalen Balance). Radovanovic et al. zeigten, dass eine Zunahme der SVA zu einer Zunahme an Beschwerden und einer Abnahme der Lebensqualität führt (Radovanovic et al., 2017).

Die vorliegende Studie überprüft die Hypothese, ob die sagittale Balance der HWS einen Einfluss auf die Entstehung von Anschlussdegenerationen und die Reoperationsrate hat.

6.1. Eignung der Parameter zum Erfassen der sagittalen Balance

6.1.1. Korrelation der Parameter

Wir konnten eine Korrelation der prä- und postoperativen sagittalen Parameter feststellen. Je größer die Lordose im operierten Segment war, desto größer waren HWS-Lordose und T1-slope. C2 SVA, C7 SVA und COG SVA nahmen mit zunehmender HWS-Lordose ab. Der T1-slope korrelierte positiv mit der SVA. Nahm dieser zu, nahm die SVA ebenfalls zu. Knott et al., konnten ebenfalls eine positive Korrelation zwischen T1-slope und C2-C7 SVA zeigen. Sie postulieren, dass der T1-slope ein sehr guter Parameter zur Erfassung der sagittalen Balance der HWS ist. Anhand des T1-slope Rückschlüsse auf die Ausrichtung der gesamten Wirbelsäule ziehen (Knott et al., 2010). In einer biomechanischen Untersuchungen eines *ex vivo* HWS-Modells konnte gezeigt werden, dass eine Zunahme des T1-slope mit einer Zunahme der C2-C7 CL einhergeht (Patwardhan et al., 2018).

Die verschiedenen HWS-Segmente und Parameter sollten als ein zusammenhängendes Konstrukt betrachtet werden. Zu diesem Schluss kommen auch Bao et al., welche die C2-C7-SVA in Kombination mit der HWS-Lordose als relevanten Parameter zur Beurteilung der sagittalen Balance sehen (Bao et al., 2017).

Die Literatur bestätigt, dass die von uns gewählten Parameter zur Erfassung der sagittalen Balance der HWS geeignet sind. Die Korrelationsanalysen dieser Studie werden durch die Ergebnisse anderer Untersuchungen bestätigt. Die erhobenen Werte in unserer Studienpopulation und die Ergebnisse der Analysen scheinen auch außerhalb dieser Population relevant zu sein.

6.1.2. Die Parameter im postoperativen Verlauf

Die normalverteilten Parameter (CL C2-C7, Seg C Lordosis und T1-slope) wurden dahingehend untersucht, ob es bei ihnen über die drei Messzeitpunkte zu einer signifikanten Änderung der Mittelwerte kam.

Kuntz et al. fanden in ihrer Metaanalyse von 12 Studien heraus, dass es eine große physiologische Varianz der Normwerte für die sagittalen Parameter der HWS gibt. Der normale, durchschnittliche Cobb Winkel (CL C2-C7) bei asymptomatischen Erwachsenen beträgt demnach $17,0^\circ \pm 14,3^\circ$ Lordose (Kuntz et al., 2007). In unserer Studienpopulation beträgt CL C2-C7 präoperativ $5,8^\circ \pm 14,4^\circ$ ($R = -28,3^\circ - 52,4^\circ$) und postoperativ $12,4^\circ \pm 12,1^\circ$ ($R = -22,6^\circ - 46,8^\circ$). Die Lordose verbessert sich signifikant durch die Operation (95% CI: $3,67^\circ - 11,46^\circ$; $p < 0,001$). Bei der Follow-up Untersuchung nach durchschnittlich $15 \pm 9,76$ Monate (1-45) zeigte sich tendenziell ein sekundärer Verlust der HWS Lordose (*loss of cervical lordosis* – LCL), jedoch blieben die Werte weiterhin besser als präoperativ.

Laut Literatur liegt die C2-C7 SVA im Durchschnitt bei $16,8 \pm 11,2$ mm (Hardacker et al., 1997) bzw. $24,4 \pm 11,6$ mm (Bao et al., 2017). In unserer Studienpopulation betrug die C2-C7 SVA präoperativ $28,3 \pm 13,1$ mm ($-4,5 - 74,1$ mm), postoperativ $34,0 \pm 12,9$ mm ($-3,3 - 81,6$ mm) und zum Follow-up $34,5 \text{mm} \pm 16,7 \text{mm}$ ($-7,6 - 97,1$ mm). Somit zeigte sich postoperativ eine Verschlechterung der C2-C7 SVA (Normbereich < 40 mm), die im Follow-up aber stabil und klinisch asymptomatisch blieb. Erst ab einer C2-C7 SVA > 40 mm scheint es laut Tang et al. zu einem subjektiv deutlich schlechteren OP-Outcome zu kommen (Tang et al., 2015).

Der physiologische T1-slope liegt laut Literatur bei 24° und nimmt mit steigendem Alter zu (Inoue et al., 2021). In unserer Untersuchungsgruppe zeigten sich höhere Werte ($28,6^\circ$ präoperativ, $33,0^\circ$ postoperativ und $32,1^\circ$ zum Follow-up). Mit 68,8 Jahren im Durchschnitt waren unsere Patienten allerdings deutlich älter als die Patienten der anderen Studien, was den hohen T1-slope erklärt. Auch ein T1-slope von $32,1^\circ$ kann bei alten Patienten physiologisch sein (Normerte T1-slope: $20^\circ - 40^\circ$). Die postoperative Zunahme der C2-C7-SVA bei unseren Patienten ist insofern überraschend, da die Lordose postoperativ ebenfalls signifikant zunimmt und zu erwarten wäre, dass dann die C2-C7-SVA abnimmt. Eine Erklärung hierfür gibt der zunehmende T1-slope. Kim et al. zeigten in ihrer Studie bezüglich des Zusammenhangs zwischen T1-slope und LCL nach Laminoplastie, dass T1-slope–

CL C2-C7 stark positiv mit C2-C7 SVA korreliert (B. Kim et al., 2016). Nimmt also der T1-slope im Verhältnis zur Lordose der HWS stärker zu, führt dies auch zu einer Zunahme von C2-C7 SVA. Der T1-slope nimmt in unserer Studie von präoperativ $28.64^{\circ} \pm 10.13^{\circ}$ ($R=2.1^{\circ}-62.4^{\circ}$) zu postoperativ $32.99^{\circ} \pm 8.76^{\circ}$ ($R=1.7^{\circ}-53.1^{\circ}$) signifikant zu, wodurch trotz zunehmender Lordose die C2-C7-SVA steigen kann.

6.2. ASD im postoperativen Verlauf

Kepler und Hilibrand fassten 2012 in einem Review zahlreiche Studien zum Auftreten von ASD nach ACDF zusammen. Sie kommen auf eine kumulative ASD-Rate von 2-3% pro Jahr im postoperativen Verlauf, nach 10 Jahren auf 25%. In einer Studie mit 374 Patienten lag die ASD Rate bei 11,7% nach 5 Jahren bzw. 19,2% nach 10 Jahren. 7,2% der Patienten mussten erneut operiert werden (Hilibrand et al., 1999; Kepler & Hilibrand, 2012). In einer Studie mit 121 Patienten (Durchschnitt > 9 Jahre Follow-up) entwickelten 19 Patienten (17%) eine ASD, 7 Patienten (6,3%) mussten erneut operiert werden (Ishihara et al., 2004). Gore und Sepic untersuchten 50 Personen nach ACDF über einen Zeitraum von 21 Jahren. Die ASD-Rate lag bei 32% (16 Patienten), 8 Patienten (16%) wurden erneut operiert (Gore & Sepic, 1998). In unserer Studie erfolgte die Follow-up Untersuchung im Mittel 15 Monate postoperativ. Die Rate an ASD-bedingten Reoperationen in unserer Studie liegt bei ca. 2,2%/Jahr, bzw. 11% nach 5 Jahren. Sie ist höher, als in der Literatur beschrieben. Zwei Gründe erscheinen wahrscheinlich. Zum einen das hohe Durchschnittsalter (68,8 Jahre) in unserer Studienpopulation, was ein bekannter Risikofaktor für Anschlussdegenerationen ist (Buckwalter, 1995). Zum anderen erhielten alle von uns untersuchten Patienten zusätzlich zur ACDF eine ventrale Verplattung. Joo et al. zeigten, dass Patienten mit Platte nach 2-Level ACDF (im Vergleich zu Patienten nach 2-Level ACDF ohne Platte) ein leicht erhöhtes Risiko für die Degeneration der anschließenden Segmente und für ASD aufwiesen (Joo, Lee, Kwon, Rhee, & Lee, 2010). Durch die Platte wird die Beweglichkeit in den fusionierten Segmenten stärker eingeschränkt, wodurch sich die Belastung der Nachbarsegmente erhöht und es vermehrt zu degenerativen Prozessen kommt (Chang et al., 2007; Hutton et al., 1998; Lopez-Espina et al., 2006).

6.3. Parameter der sagittalen Balance als Prädiktor für eine ASD-bedingte Reoperation

Durch sagittale Imbalance nach operativer Fusion kommt es vermehrt zur Degeneration der benachbarten Bewegungssegmente (Djurasovic et al., 2008; P. Park et al., 2004; Patwardhan et al., 2018). ASD ist eine häufige Komplikation und führt nicht selten zu Reoperationen (Gore & Sepic, 1984; Hilibrand et al., 1999; Ishihara et al., 2004; Yue, Brodner, & Highland, 2005). In unserer Studienpopulation konnten wir keinen signifikanten Zusammenhang zwischen den gemessenen Parametern und einer Operation der Anschlusssegmente aufgrund von ASD feststellen.

6.3.1. Präoperative Bildgebung

Wird ein höherer T1-slope gemessen, scheinen das OP-Outcome besser und das Risiko für eine Reoperation niedriger zu sein (OR 0.920, 95% CI: 0.830 – 1.010; $p = 0.067$). Eine Zunahme der C2-C7 SVA korreliert mit einer höheren Reoperationsrate (OR 1.108, 95% CI: 0.890 – 1.326; $p = 0.355$).

Trotz der fehlenden Signifikanz erscheinen oben genannte Ergebnisse plausibel. Nimmt der T1-slope ab, wird die gesamte HWS kompensatorisch kyphotisch, um weiterhin einen horizontalen Blick zu ermöglichen. Kyphose ist ein Risikofaktor, der mit beschleunigtem und vermehrtem Auftreten von ASD einhergeht (Katsuura et al., 2001). Daher macht es Sinn, dass ein niedriger T1-slope mit einem erhöhten Risiko für eine ASD-bedingte Reoperation einhergeht. Verschiedene Arbeiten zeigen eine positive Korrelation zwischen den beiden Parametern (Cho et al., 2014; B. Kim et al., 2016; T. H. Kim, Lee, Kim, Park, & Kim, 2013; Lin et al., 2015). Der T1-slope wird von verschiedenen Faktoren (z.B. Alter, Haltung) beeinflusst und ein hoher T1-slope bedeutet nicht automatisch eine ausreichende HWS-Lordose. Kim et al. wiesen eine signifikante positive Korrelation zwischen diesem Wert und der C2-C7 SVA nach (B. Kim et al., 2016). Je größer der T1-slope im Vergleich zur HWS-Lordose, desto größer die C2-C7 SVA und somit auch die sagittale Imbalance der Halswirbelsäule. Diese Beobachtung deckt sich mit unseren Ergebnissen. Ein größerer T1-slope geht in der Regel mit einer größeren Lordose der HWS einher. Steigt bei zunehmendem T1-slope nun auch die C2-C7 SVA, ist anzunehmen, dass dies durch eine zu

geringen HWS-Lordose bedingt ist. Mit zunehmender C2-C7 SVA nimmt die sagittale Imbalance der HWS zu, was das Auftreten von ASD und eine dadurch bedingte Reoperation begünstigen kann.

Den Ergebnissen unserer Studie nach kann man anhand des T1-slope Rückschlüsse auf das Risiko einer ASD und eine dadurch bedingte Reoperation nach ACDF ziehen. Je flacher der T1-slope, desto größer das Reoperationsrisiko. Diese Beobachtung ist in unserer Auswertung nicht signifikant.

6.3.2. Postoperative Bildgebung

Mit zunehmender C2-C7-SVA scheint das Reoperationsrisiko zu steigen (OR 1.169; 95% CI: 0.975 - 1.363; $p = 0.115$). Dieser Zusammenhang ist nicht signifikant.

Kim et al. fanden heraus, dass eine Zunahme der C2-C7 SVA mit einer zunehmenden sagittalen Imbalance einhergehen kann (B. Kim et al., 2016). Dies deckt sich mit unseren Ergebnissen, wonach sich das Risiko für das Auftreten von ASD und für eine Reoperation mit zunehmender C2-C7 SVA erhöht.

Für die übrigen Parameter ergab sich keine signifikante Korrelation zum Reoperationsrisiko. Dies ist unerwartet, da bereits zahlreiche Studien den Zusammenhang zwischen der sagittalen Balance der Wirbelsäule und dem Auftreten von ASD nachgewiesen haben (Djurasovic et al., 2008; Katsuura et al., 2001; Kumar et al., 2001; P. Park et al., 2004; Rahm & Hall, 1996).

Mögliche Erklärungen hierfür liegen in unserem Studiendesign (siehe 6.6 Limitationen der Studie). Auch wurden nur die Fälle von ASD erfasst, bei denen es zu einer Reoperation kam. Um unsere Ergebnisse zu überprüfen, sind prospektive Studien zu dieser Thematik mit einem größeren Patientenkollektiv sowie längerer Follow-up-Zeit notwendig.

6.4. Untersuchung der Sinterungstendenz der Cages

Cagesinterung ist eine häufig auftretende Komplikation nach ACDF bzw. ACCF (Bartels, Donk, & Feuth, 2006; Kolstad, Nygaard, Andresen, & Leivseth, 2010; J. J. Yang et al., 2011).

Park et al. untersuchten 77 Patienten ein Jahr nach Single-level-ACDF. Bei 26 Patienten (33,8%) zeigte sich eine Sinterung des Cages. Die Sinterung korrelierte dabei weder mit der Fusionsrate, noch mit dem klinischen Outcome (J. Y. Park et al., 2016). Brenke et al. konnten keinen Zusammenhang zwischen Cagesinterung und der Knochendichtefeststellen (Brenke et al., 2015). In unserer Studienpopulation kam es lediglich bei einem Patienten zu einer Cage-Sinterung. Eine Auswertung war somit nicht sinnvoll. Im Unterschied zu anderen Studien untersuchten wir lediglich Patienten mit Cage und ventraler Platte. Die zusätzliche Platte scheint einer Cagesinterung vorzubeugen.

Eine ventrale Plattenosteosynthese hat aber auch Nachteile und kann das Auftreten von ASD begünstigen (Joo et al., 2010).

6.5. Weitere Faktoren als mögliche Prädiktoren für die Wahrscheinlichkeit einer Reoperation

Es zeigt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Grad der Facettengelenksdegeneration und dem Reoperationsrisiko. Gleiches gilt für Primär- und Revisionseingriff, die Anzahl der operierten Segmente und die Operationsdauer. Die Knochendichte der Patienten mit Reoperation ($218.2 \pm 30.9 \text{ mg/mL}$) unterschied sich nicht signifikant von der Knochendichte der Patienten ohne Reoperation ($215.6 \pm 33.1 \text{ mg/mL}$). Laut Yoganandan et al. liegt der Normwert der zervikalen Knochendichte gesunder Erwachsener bei $256 \pm 48.1 \text{ mg/mL}$ ($154.5 - 429.9$) (Yoganandan et al., 2006). Nach Kaesmacher et al. ist eine Osteopenie definiert als eine zervikale BMD $<220 \text{ mg/mL}$, eine Osteoporose besteht bei einer zervikalen BMD $<180 \text{ mg/mL}$ (Kaesmacher et al., 2017). In beiden Gruppen zeigte sich im Mittel eine leichte Osteopenie, allerdings keine Osteoporose.

6.6. Limitationen der Studie

Es handelt sich um eine retrospektive Studie. Der Nachteil retrospektiver Studien liegt in der schlechteren Datenqualität und der geringeren Aussagekraft der Ergebnisse im Vergleich zu prospektiven Studien.

Die Röntgenbilder sollten im Idealfall standardisiert aufgenommen worden sein, jedoch ist dies erfahrungsgemäß nicht immer der Fall. Abweichungen vom Standard können zu einer Ungenauigkeit der gemessenen Werte führen.

Die Vermessung der radiologischen Bilder, sowie die Interpretation der erhobenen Messwerte erfolgten durch den Verfasser, was zu einem gewissen Bias geführt haben kann. Auch wurde ein sehr heterogenes Patientenkollektiv untersucht mit unterschiedlichen Risikofaktoren und Vorerkrankungen, die die Ergebnisse beeinflussen können. Zudem gab es keine festgelegten Follow-up Zeitpunkte.

Patienten kamen im Durchschnitt 15 Monate nach der Operation zur Nachuntersuchung, wobei die Standardabweichung mit 9 Monaten groß ist. Für die Erhebung der Daten stand lediglich das Patientenarchiv der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie des Klinikums rechts der Isar zur Verfügung. Patienten wurden für unsere Studie nicht kontaktiert oder einbestellt. Dokumentationsungenauigkeiten und eine subjektive Informationsfilterung durch die Untersucher können nicht ausgeschlossen werden. Auch ist es möglich, dass Revisionseingriffe in anderen Kliniken durchgeführt wurden und somit nicht in der Auswertung berücksichtigt werden konnten..

7. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen darauf schließen, dass die sagittale Balance das Auftreten von ASD nach ACDF bzw. ACCF mit ventraler Plattenosteosynthese und das Risiko für eine ASD-bedingte Reoperation beeinflusst.

Obwohl sich für diese Fragestellung in unserer Analyse keine signifikanten Ergebnisse fanden, ergaben sich dennoch Tendenzen, die in Kombination mit einer Analyse der verfügbaren Literatur vermuten lassen, dass eine sagittale Imbalance die Entstehung von ASD fördert und das Risiko einer Reoperation erhöht.

Der präoperative T1-slope scheint am ehesten geeignet, das Risiko für eine Reoperation einzuschätzen. Je flacher der T1-slope, desto größer das Risiko, wenn dies mit einer erhöhten C2-C7 SVA und verminderten HWS Lordose vergesellschaftet ist. Aufgrund der fehlenden Signifikanz dieser Beobachtung sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

In der postoperativen Bildgebung scheint die C2-C7-SVA ein Parameter zu sein, mit der man das Reoperationsrisiko einschätzen kann. Je größer die C2-C7 SVA, desto höher das Risiko für eine ASD-bedingte Reoperation. Tang et al. fanden heraus, dass eine C2-C7 SVA von > 40 mm mit einem deutlich schlechteren OP-Outcome verbunden ist (Tang et al., 2015), Kim et al., dass eine hohe C2-C7 SVA auf eine sagittale Imbalance hinweisen kann (B. Kim et al., 2016).

Die Segmentlordose im postoperativen Röntgenbild scheint als Parameter zur Einschätzung des ASD-bedingten Reoperationsrisikos lediglich eingeschränkt geeignet zu sein. Durch die physiologische Varianz der Lordosewinkel der unterschiedlichen Höhen ist die Aussagekraft dieses Parameters eingeschränkt. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass andere Faktoren, wie z.B. das Alter oder der Degenerationszustand, die Analyse beeinflusst haben. Um eine definitive Aussage zu treffen sind hier weitere Untersuchungen notwendig.

Für die übrigen Parameter der sagittalen Balance ergab sich in unserer Studie weder präoperativ, noch postoperativ eine signifikante Korrelation mit der Rate an ASD-bedingten Reoperationen.

Bisherige Studien lassen darauf schließen, dass die sagittale Balance einen Einfluss auf die Entstehung von ASD und somit auch auf die Reoperationsrate hat. Für die

Lendenwirbelsäule wurde der Zusammenhang zwischen postoperativer Imbalance und dem Auftreten von symptomatischer ASD bereits nachgewiesen.

Eine ursprünglich angedachte Untersuchung der Sinterungstendenz der Cages in Zusammenhang mit der Knochendichte erwies sich als nicht zielführend, da in unserem Patientenkollektiv nahezu keine Sinterung zu beobachten war.

In der Literatur finden sich außerdem Hinweise darauf, dass eine ventrale Verplattung zusätzlich die Entstehung von ASD beschleunigen könnte (Joo et al., 2010). Viele Studien zu diesem Thema existieren zum jetzigen Zeitpunkt nicht, sodass aus unserer Sicht ein Vergleich zwischen Patienten mit ventraler Platte und Patienten ohne ventrale Platte im Hinblick auf das Auftreten von ASD sinnvoll ist.

Als Fazit dieser Studie lässt sich sagen, dass die sagittale Balance vermutlich einen Einfluss auf die Entstehung von ASD und die Rate an Reoperationen hat. Aufgrund fehlender Signifikanz unsere Ergebnisse sind weitere Studien zu dieser Thematik notwendig. Zur Verbesserung der Daten- und Ergebnisqualität empfiehlt sich, dies im Rahmen einer prospektiven Studie mit einem langen Follow-up-Zeitraum durchzuführen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Bein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Yu-Mi Ryang für die freundliche Überlassung des hochinteressanten Themas, die hervorragende Betreuung und die enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit, sowie die zahlreichen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge auf dem Weg zur Fertigstellung der Dissertation.

Außerdem möchte ich mich bei Frau DI Dr. med. univ. Anna Rienmüller bedanken, die mir die Thematik das erste Mal erklärt und mich als Mentorin in das Thema eingearbeitet hat, stets ein offenes Ohr für Fragen hatte und mich auf meinem Weg mit gutem Rat und Anregungen begleitete.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem Mitdoktoranden Martin Erhard für die Unterstützung während der Phase der Datenerhebung, sowie den produktiven Gedankenaustausch zu den ersten Auswertungen der erhobenen Daten.

Für den Zugang zu den Patientendaten und somit die Grundlage dieser Dissertation muss ich der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie unter der Leitung von Univ. Prof. Dr. med. Bernhard Meyer meinen Dank ausdrücken.

Ich danke Johannes Stucke für die gegenseitige Motivation und den Ideenaustausch während vieler Stunden des gemeinsamen Forschens in Bibliotheken und Cafés.

Nicht zuletzt danke ich meinen Geschwistern und Freunden für ihre Ermutigungen und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation. Sie motivierten mich stets dazu, weiter zu machen und diese Arbeit schlussendlich fertigzustellen.

Insbesondere danke ich meinen Eltern, die immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatten, mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und mir überhaupt erst das Medizinstudium und somit auch diese Promotion ermöglichten.

Quellenverzeichnis

- Albert, T. J., & Vacarro, A. (1998). Postlaminectomy kyphosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 23(24), 2738-2745. doi:10.1097/00007632-199812150-00014
- Alijani, B., & Rasouljan, J. (2020). The Sagittal Balance of the Cervical Spine: Radiographic Analysis of Interdependence between the Occipitocervical and Spinopelvic Alignment. *Asian Spine J*, 14(3), 287-297. doi:10.31616/asj.2019.0165
- Ames, C. P., Blondel, B., Scheer, J. K., Schwab, F. J., Le Huec, J. C., Massicotte, E. M., . . . Lafage, V. (2013). Cervical radiographical alignment: comprehensive assessment techniques and potential importance in cervical myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(22 Suppl 1), S149-160. doi:10.1097/BRS.0b013e3182a7f449
- Azimi, P., Yazdani, T., Benzel, E. C., Hai, Y., & Montazeri, A. (2021). Sagittal balance of the cervical spine: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J*, 30(6), 1411-1439. doi:10.1007/s00586-021-06825-0
- Baba, H., Furusawa, N., Imura, S., Kawahara, N., Tsuchiya, H., & Tomita, K. (1993). Late radiographic findings after anterior cervical fusion for spondylotic myeloradiculopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*, 18(15), 2167-2173. doi:10.1097/00007632-199311000-00004
- Bao, H., Varghese, J., Lafage, R., Liabaud, B., Diebo, B., Ramchandran, S., . . . Lafage, V. (2017). Principal Radiographic Characteristics for Cervical Spinal Deformity: A Health-related Quality-of-life Analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 42(18), 1375-1382. doi:10.1097/brs.0000000000002144
- Bartels, R. H., Donk, R. D., & Feuth, T. (2006). Subsidence of stand-alone cervical carbon fiber cages. *Neurosurgery*, 58(3), 502-508; discussion 502-508. doi:10.1227/01.NEU.0000197258.30821.50
- Benninghoff, A., & Drenckhahn, D. (2014). *Taschenbuch Anatomie*. München: Elsevier, Urban & Fischer.
- Berthonnaud, E., Dimnet, J., Roussouly, P., & Labelle, H. (2005). Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech*, 18(1), 40-47. doi:10.1097/01.bsd.0000117542.88865.77
- Berthonnaud, E., Labelle, H., Roussouly, P., Grimard, G., Vaz, G., & Dimnet, J. (2005). A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiologic measurements of trunk balance. *J Spinal Disord Tech*, 18(1), 66-71. doi:10.1097/01.bsd.0000128345.32521.43
- Blondel, B., Schwab, F., Bess, S., Ames, C., Mummaneni, P. V., Hart, R., . . . Lafage, V. (2013). Posterior global malalignment after osteotomy for sagittal plane deformity: it happens and here is why. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(7), E394-401. doi:10.1097/BRS.0b013e3182872415
- Bogduk, N., & Mercer, S. (2000). Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 15(9), 633-648. doi:10.1016/s0268-0033(00)00034-6
- Bohlman, H. H., Emery, S. E., Goodfellow, D. B., & Jones, P. K. (1993). Robinson anterior cervical discectomy and arthrodesis for cervical radiculopathy. Long-term follow-up of one hundred and twenty-two patients. *J Bone Joint Surg Am*, 75(9), 1298-1307. doi:10.2106/00004623-199309000-00005
- Boulay, C., Tardieu, C., Hecquet, J., Benaïm, C., Mouilleseaux, B., Marty, C., . . . Pelissier, J. (2006). Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard

- values and prediction of lordosis. *Eur Spine J*, 15(4), 415-422. doi:10.1007/s00586-005-0984-5
- Brenke, C., Dostal, M., Scharf, J., Weiss, C., Schmieder, K., & Barth, M. (2015). Influence of cervical bone mineral density on cage subsidence in patients following stand-alone anterior cervical discectomy and fusion. *Eur Spine J*, 24(12), 2832-2840. doi:10.1007/s00586-014-3725-9
- Buckwalter, J. A. (1995). Aging and degeneration of the human intervertebral disc. *Spine (Phila Pa 1976)*, 20(11), 1307-1314. doi:10.1097/00007632-199506000-00022
- Cacho-Rodrigues, P., Campana, M., Obeid, I., Vital, J. M., & Gille, O. (2016). Sagittal Correction and Reciprocal Changes After Thoracic Pedicle Subtraction Osteotomy. *Spine (Phila Pa 1976)*, 41(13), E791-e797. doi:10.1097/brs.0000000000001386
- Caspar, W., Barbier, D. D., & Klara, P. M. (1989). Anterior cervical fusion and Caspar plate stabilization for cervical trauma. *Neurosurgery*, 25(4), 491-502. doi:10.1097/00006123-198910000-00001
- Chang, U. K., Kim, D. H., Lee, M. C., Willenberg, R., Kim, S. H., & Lim, J. (2007). Changes in adjacent-level disc pressure and facet joint force after cervical arthroplasty compared with cervical discectomy and fusion. *J Neurosurg Spine*, 7(1), 33-39. doi:10.3171/SPI-07/07/033
- Cho, J. H., Ha, J. K., Kim, D. G., Song, K. Y., Kim, Y. T., Hwang, C. J., . . . Lee, D. H. (2014). Does preoperative T1 slope affect radiological and functional outcomes after cervical laminoplasty? *Spine (Phila Pa 1976)*, 39(26), E1575-1581. doi:10.1097/BRS.0000000000000614
- Chung, J. Y., Park, J. B., Seo, H. Y., & Kim, S. K. (2016). Adjacent Segment Pathology after Anterior Cervical Fusion. *Asian Spine J*, 10(3), 582-592. doi:10.4184/asj.2016.10.3.582
- Denis, F. (1983). The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)*, 8(8), 817-831. doi:10.1097/00007632-198311000-00003
- DenOtter, T. D., & Schubert, J. (2021). Hounsfield Unit. In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing
- Copyright © 2021, StatPearls Publishing LLC.
- Deutsch, H., Haid, R. W., Rodts, G. E., & Mummaneni, P. V. (2003). Postlaminectomy cervical deformity. *Neurosurg Focus*, 15(3), E5. doi:10.3171/foc.2003.15.3.5
- Djurasovic, M. O., Carreon, L. Y., Glassman, S. D., Dimar, J. R., 2nd, Puno, R. M., & Johnson, J. R. (2008). Sagittal alignment as a risk factor for adjacent level degeneration: a case-control study. *Orthopedics*, 31(6), 546.
- Dmitriev, A. E., Kuklo, T. R., Lehman, R. A., Jr., & Rosner, M. K. (2007). Stabilizing potential of anterior, posterior, and circumferential fixation for multilevel cervical arthrodesis: an in vitro human cadaveric study of the operative and adjacent segment kinematics. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(6), E188-196. doi:10.1097/01.brs.0000257577.70576.07
- Eck, J. C., Humphreys, S. C., Lim, T. H., Jeong, S. T., Kim, J. G., Hodges, S. D., & An, H. S. (2002). Biomechanical study on the effect of cervical spine fusion on adjacent-level intradiscal pressure and segmental motion. *Spine (Phila Pa 1976)*, 27(22), 2431-2434. doi:10.1097/00007632-200211150-00003
- Edwards, C. C., 2nd, Riew, K. D., Anderson, P. A., Hilibrand, A. S., & Vaccaro, A. F. (2003). Cervical myelopathy. current diagnostic and treatment strategies. *Spine J*, 3(1), 68-81. doi:10.1016/s1529-9430(02)00566-1
- Frisch, H. (2003). *Programmierte Therapie am Bewegungsapparat*. Berlin [u.a.]: Springer.

- Gay, R. E. (1993). The curve of the cervical spine: variations and significance. *J Manipulative Physiol Ther*, 16(9), 591-594. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8133194>
- Gercek, E., Arlet, V., Delisle, J., & Marchesi, D. (2003). Subsidence of stand-alone cervical cages in anterior interbody fusion: warning. *Eur Spine J*, 12(5), 513-516. doi:10.1007/s00586-003-0539-6
- Global Burden of Disease Study, C. (2015). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet*, 386(9995), 743-800. doi:10.1016/S0140-6736(15)60692-4
- Goffin, J., Geusens, E., Vantomme, N., Quintens, E., Waerzeggers, Y., Depreitere, B., . . . van Loon, J. (2004). Long-term follow-up after interbody fusion of the cervical spine. *J Spinal Disord Tech*, 17(2), 79-85. doi:10.1097/00024720-200404000-00001
- Gore, D. R., & Sepic, S. B. (1984). Anterior cervical fusion for degenerated or protruded discs. A review of one hundred forty-six patients. *Spine (Phila Pa 1976)*, 9(7), 667-671. doi:10.1097/00007632-198410000-00002
- Gore, D. R., & Sepic, S. B. (1998). Anterior discectomy and fusion for painful cervical disc disease. A report of 50 patients with an average follow-up of 21 years. *Spine (Phila Pa 1976)*, 23(19), 2047-2051. doi:10.1097/00007632-199810010-00002
- Han, M. S., Lee, G. J., Kim, J. H., Lee, S. K., Moon, B. J., & Lee, J. K. (2018). Outcomes of Anterior Cervical Fusion Using Polyetheretherketone Cage with Demineralized Bone Matrix and Plate for Management of Subaxial Cervical Spine Injuries. *Korean J Neurotrauma*, 14(2), 123-128. doi:10.13004/kjnt.2018.14.2.123
- Hansen, M. A., Kim, H. J., Van Alstyne, E. M., Skelly, A. C., & Fehlings, M. G. (2012). Does postsurgical cervical deformity affect the risk of cervical adjacent segment pathology? A systematic review. *Spine (Phila Pa 1976)*, 37(22 Suppl), S75-84. doi:10.1097/BRS.0b013e31826d62a6
- Hardacker, J. W., Shuford, R. F., Capicotto, P. N., & Pryor, P. W. (1997). Radiographic standing cervical segmental alignment in adult volunteers without neck symptoms. *Spine (Phila Pa 1976)*, 22(13), 1472-1480; discussion 1480. doi:10.1097/00007632-199707010-00009
- Harding, I. J. (2009). Understanding sagittal balance with a clinical perspective. *Eur J Phys Rehabil Med*, 45(4), 571-582.
- Henschke, N., Kamper, S. J., & Maher, C. G. (2015). The epidemiology and economic consequences of pain. *Mayo Clin Proc*, 90(1), 139-147. doi:10.1016/j.mayocp.2014.09.010
- Hilibrand, A. S., Carlson, G. D., Palumbo, M. A., Jones, P. K., & Bohlman, H. H. (1999). Radiculopathy and myelopathy at segments adjacent to the site of a previous anterior cervical arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*, 81(4), 519-528. doi:10.2106/00004623-199904000-00009
- Hilibrand, A. S., & Robbins, M. (2004). Adjacent segment degeneration and adjacent segment disease: the consequences of spinal fusion? *Spine J*, 4(6 Suppl), 190S-194S. doi:10.1016/j.spinee.2004.07.007
- Hoy, D., March, L., Woolf, A., Blyth, F., Brooks, P., Smith, E., . . . Buchbinder, R. (2014). The global burden of neck pain: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Ann Rheum Dis*, 73(7), 1309-1315. doi:10.1136/annrheumdis-2013-204431

- Hussain, M., Nassr, A., Natarajan, R. N., An, H. S., & Andersson, G. B. (2013). Biomechanics of adjacent segments after a multilevel cervical corpectomy using anterior, posterior, and combined anterior-posterior instrumentation techniques: a finite element model study. *Spine J*, 13(6), 689-696. doi:10.1016/j.spinee.2013.02.062
- Hutton, W. C., Toribatake, Y., Elmer, W. A., Ganey, T. M., Tomita, K., & Whitesides, T. E. (1998). The effect of compressive force applied to the intervertebral disc in vivo. A study of proteoglycans and collagen. *Spine (Phila Pa 1976)*, 23(23), 2524-2537. doi:10.1097/00007632-199812010-00007
- Inoue, T., Ando, K., Kobayashi, K., Nakashima, H., Ito, K., Katayama, Y., . . . Imagama, S. (2021). Age-related Changes in T1 and C7 Slope and the Correlation Between Them in More Than 300 Asymptomatic Subjects. *Spine (Phila Pa 1976)*, 46(8), E474-e481. doi:10.1097/brs.00000000000003813
- Ishihara, H., Kanamori, M., Kawaguchi, Y., Nakamura, H., & Kimura, T. (2004). Adjacent segment disease after anterior cervical interbody fusion. *Spine J*, 4(6), 624-628. doi:10.1016/j.spinee.2004.04.011
- Javedan, S. P., & Dickman, C. A. (1999). Cause of adjacent-segment disease after spinal fusion. *Lancet*, 354(9178), 530-531. doi:10.1016/S0140-6736(99)00201-9
- Jean, L. (2014). Influence of age and sagittal balance of the spine on the value of the pelvic incidence. *Eur Spine J*, 23(7), 1394-1399. doi:10.1007/s00586-014-3207-0
- Joo, Y. H., Lee, J. W., Kwon, K. Y., Rhee, J. J., & Lee, H. K. (2010). Comparison of fusion with cage alone and plate instrumentation in two-level cervical degenerative disease. *J Korean Neurosurg Soc*, 48(4), 342-346. doi:10.3340/jkns.2010.48.4.342
- Kaesmacher, J., Schweizer, C., Valentinitsch, A., Baum, T., Rienmuller, A., Meyer, B., . . . Ryang, Y. M. (2017). Osteoporosis Is the Most Important Risk Factor for Odontoid Fractures in the Elderly. *J Bone Miner Res*, 32(7), 1582-1588. doi:10.1002/jbmr.3120
- Kaiser, M. G., Mummaneni, P. V., Matz, P. G., Anderson, P. A., Groff, M. W., Heary, R. F., . . . Congress of Neurological, S. (2009). Radiographic assessment of cervical subaxial fusion. *J Neurosurg Spine*, 11(2), 221-227. doi:10.3171/2009.3.SPINE08719
- Karikari, I. O., Jain, D., Owens, T. R., Gottfried, O., Hodges, T. R., Nimjee, S. M., & Bagley, C. A. (2014). Impact of subsidence on clinical outcomes and radiographic fusion rates in anterior cervical discectomy and fusion: a systematic review. *J Spinal Disord Tech*, 27(1), 1-10. doi:10.1097/BSD.0b013e31825bd26d
- Katsuura, A., Hukuda, S., Saruhashi, Y., & Mori, K. (2001). Kyphotic malalignment after anterior cervical fusion is one of the factors promoting the degenerative process in adjacent intervertebral levels. *Eur Spine J*, 10(4), 320-324. doi:10.1007/s005860000243
- Kellgren, J. H., & Lawrence, J. S. (1952). Rheumatism in miners. II. X-ray study. *Br J Ind Med*, 9(3), 197-207. doi:10.1136/oem.9.3.197
- Kellgren, J. H., & Lawrence, J. S. (1957). Radiological assessment of osteo-arthritis. *Ann Rheum Dis*, 16(4), 494-502. doi:10.1136/ard.16.4.494
- Kepler, C. K., & Hilibrand, A. S. (2012). Management of adjacent segment disease after cervical spinal fusion. *Orthop Clin North Am*, 43(1), 53-62, viii. doi:10.1016/j.jocl.2011.08.003
- Kim, B., Yoon, D. H., Ha, Y., Yi, S., Shin, D. A., Lee, C. K., . . . Kim, K. N. (2016). Relationship between T1 slope and loss of lordosis after laminoplasty in patients with cervical ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spine J*, 16(2), 219-225. doi:10.1016/j.spinee.2015.10.042

- Kim, T. H., Lee, S. Y., Kim, Y. C., Park, M. S., & Kim, S. W. (2013). T1 slope as a predictor of kyphotic alignment change after laminoplasty in patients with cervical myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(16), E992-997. doi:10.1097/BRS.0b013e3182972e1b
- Knott, P. T., Mardjetko, S. M., & Techy, F. (2010). The use of the T1 sagittal angle in predicting overall sagittal balance of the spine. *Spine J*, 10(11), 994-998. doi:10.1016/j.spinee.2010.08.031
- Kolstad, F., Nygaard, O. P., Andresen, H., & Leivseth, G. (2010). Anterior cervical arthrodesis using a "stand alone" cylindrical titanium cage: prospective analysis of radiographic parameters. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(16), 1545-1550. doi:10.1097/BRS.0b013e3181d259c1
- König, A., & Spetzger, U. (2014). *Degenerative Erkrankungen der Halswirbelsäule*. Berlin [u.a.]: Springer.
- König, S. A., Ranguis, S., & Spetzger, U. (2015). Management of complex cervical instability. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*, 76(2), 119-125. doi:10.1055/s-0033-1345095
- Kosuri, K. C., Venumadhav, N., & Ks, S. (2014). Ossified ligamentum longitudinale anterius in adult human dry vertebrae. *J Clin Diagn Res*, 8(8), AC04-06. doi:10.7860/JCDR/2014/8691.4702
- Kumar, M. N., Baklanov, A., & Chopin, D. (2001). Correlation between sagittal plane changes and adjacent segment degeneration following lumbar spine fusion. *Eur Spine J*, 10(4), 314-319. doi:10.1007/s005860000239
- Kuntz, C. t., Levin, L. S., Ondra, S. L., Shaffrey, C. I., & Morgan, C. J. (2007). Neutral upright sagittal spinal alignment from the occiput to the pelvis in asymptomatic adults: a review and resynthesis of the literature. *J Neurosurg Spine*, 6(2), 104-112. doi:10.3171/spi.2007.6.2.104
- Kwon, W. K., Kim, P. S., Ahn, S. Y., Song, J. Y., Kim, J. H., Park, Y. K., . . . Moon, H. J. (2017). Analysis of Associating Factors With C2-7 Sagittal Vertical Axis After Two-level Anterior Cervical Fusion: Comparison Between Plate Augmentation and Stand-alone Cages. *Spine (Phila Pa 1976)*, 42(5), 318-325. doi:10.1097/BRS.0000000000001776
- Legaye, J., Duval-Beaupere, G., Hecquet, J., & Marty, C. (1998). Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J*, 7(2), 99-103. doi:10.1007/s005860050038
- Lin, S., Zhou, F., Sun, Y., Chen, Z., Zhang, F., & Pan, S. (2015). The severity of operative invasion to the posterior muscular-ligament complex influences cervical sagittal balance after open-door laminoplasty. *Eur Spine J*, 24(1), 127-135. doi:10.1007/s00586-014-3605-3
- Lopez-Espina, C. G., Amirouche, F., & Havalad, V. (2006). Multilevel cervical fusion and its effect on disc degeneration and osteophyte formation. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(9), 972-978. doi:10.1097/01.brs.0000215205.66437.c3
- Lorenz, M., Patwardhan, A., & Vanderby, R., Jr. (1983). Load-bearing characteristics of lumbar facets in normal and surgically altered spinal segments. *Spine (Phila Pa 1976)*, 8(2), 122-130. doi:10.1097/00007632-198303000-00002
- Louis, R. (1985). Spinal stability as defined by the three-column spine concept. *Anat Clin*, 7(1), 33-42. doi:10.1007/BF01654627
- Lunsford, L. D., Bissonette, D. J., Jannetta, P. J., Sheptak, P. E., & Zorub, D. S. (1980). Anterior surgery for cervical disc disease. Part 1: Treatment of lateral cervical disc herniation in 253 cases. *J Neurosurg*, 53(1), 1-11. doi:10.3171/jns.1980.53.1.0001

- Maiman, D. J., Kumaresan, S., Yoganandan, N., & Pintar, F. A. (1999). Biomechanical effect of anterior cervical spine fusion on adjacent segments. *Biomed Mater Eng*, 9(1), 27-38. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10436851>
- Maldonado, C. V., Paz, R. D., & Martin, C. B. (2011). Adjacent-level degeneration after cervical disc arthroplasty versus fusion. *Eur Spine J*, 20 Suppl 3, 403-407. doi:10.1007/s00586-011-1916-1
- Matsunaga, S., Kabayama, S., Yamamoto, T., Yone, K., Sakou, T., & Nakanishi, K. (1999). Strain on intervertebral discs after anterior cervical decompression and fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*, 24(7), 670-675. doi:10.1097/00007632-199904010-00011
- McAviney, J., Schulz, D., Bock, R., Harrison, D. E., & Holland, B. (2005). Determining the relationship between cervical lordosis and neck complaints. *J Manipulative Physiol Ther*, 28(3), 187-193. doi:10.1016/j.jmpt.2005.02.015
- Medow, J. E., Trost, G., & Sandin, J. (2006). Surgical management of cervical myelopathy: indications and techniques for surgical corpectomy. *Spine J*, 6(6 Suppl), 233s-241s. doi:10.1016/j.spinee.2006.05.007
- Nachemson, A. (1960). Lumbar intradiscal pressure. Experimental studies on post-mortem material. *Acta Orthop Scand Suppl*, 43, 1-104. doi:10.3109/ort.1960.31.suppl-43.01
- Niethard, F. U., Pfeil, J., & Biberthaler, P. (2009). *Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart: Thieme.
- Oda, I., Cunningham, B. W., Buckley, R. A., Goebel, M. J., Haggerty, C. J., Orbegoso, C. M., & McAfee, P. C. (1999). Does spinal kyphotic deformity influence the biomechanical characteristics of the adjacent motion segments? An in vivo animal model. *Spine (Phila Pa 1976)*, 24(20), 2139-2146. doi:10.1097/00007632-199910150-00014
- Pal, G. P., & Sherk, H. H. (1988). The vertical stability of the cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 13(5), 447-449. doi:10.1097/00007632-198805000-00001
- Park, D. H., Ramakrishnan, P., Cho, T. H., Lorenz, E., Eck, J. C., Humphreys, S. C., & Lim, T. H. (2007). Effect of lower two-level anterior cervical fusion on the superior adjacent level. *J Neurosurg Spine*, 7(3), 336-340. doi:10.3171/SPI-07/09/336
- Park, J. Y., Choi, K. Y., Moon, B. J., Hur, H., Jang, J. W., & Lee, J. K. (2016). Subsidence after single-level anterior cervical fusion with a stand-alone cage. *J Clin Neurosci*, 33, 83-88. doi:10.1016/j.jocn.2016.01.042
- Park, M. S., Moon, S. H., Lee, H. M., Kim, S. W., Kim, T. H., Lee, S. Y., & Riew, K. D. (2013). The effect of age on cervical sagittal alignment: normative data on 100 asymptomatic subjects. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(8), E458-463. doi:10.1097/BR5.0b013e31828802c2
- Park, P., Garton, H. J., Gala, V. C., Hoff, J. T., & McGillicuddy, J. E. (2004). Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature. *Spine (Phila Pa 1976)*, 29(17), 1938-1944. doi:10.1097/01.brs.0000137069.88904.03
- Park, S. B., Jahng, T. A., & Chung, C. K. (2012). Remodeling of adjacent spinal alignments following cervical arthroplasty and anterior discectomy and fusion. *Eur Spine J*, 21(2), 322-327. doi:10.1007/s00586-011-2000-6
- Patwardhan, A. G., Khayatadeh, S., Havey, R. M., Voronov, L. I., Smith, Z. A., Kalmanson, O., . . . Sears, W. (2018). Cervical sagittal balance: a biomechanical perspective can help clinical practice. *Eur Spine J*, 27(Suppl 1), 25-38. doi:10.1007/s00586-017-5367-1
- Radovanovic, I., Urquhart, J. C., Ganapathy, V., Siddiqi, F., Gurr, K. R., Bailey, S. I., & Bailey, C. S. (2017). Influence of postoperative sagittal balance and spinopelvic parameters on the outcome of patients surgically treated for degenerative lumbar spondylolisthesis. *J Neurosurg Spine*, 26(4), 448-453. doi:10.3171/2016.9.SPINE1680

- Ragab, A. A., Escarcega, A. J., & Zdeblick, T. A. (2006). A quantitative analysis of strain at adjacent segments after segmental immobilization of the cervical spine. *J Spinal Disord Tech*, 19(6), 407-410. doi:10.1097/00024720-200608000-00006
- Rahm, M. D., & Hall, B. B. (1996). Adjacent-segment degeneration after lumbar fusion with instrumentation: a retrospective study. *J Spinal Disord*, 9(5), 392-400. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8938607>
- Rihn, J. A., Lawrence, J., Gates, C., Harris, E., & Hilibrand, A. S. (2009). Adjacent segment disease after cervical spine fusion. *Instr Course Lect*, 58, 747-756.
- Rosenthal, P., & Kim, K. D. (2013). Cervical adjacent segment pathology following fusion: Is it due to fusion? *World J Orthop*, 4(3), 112-113. doi:10.5312/wjo.v4.i3.112
- Rossanez, R., de Rezende Pratali, R., Smith, J. S., Nasreddine, M. A., & Pereira da Silva Herrero, C. F. (2023). Internal Chain of Correlation of Sagittal Cervical Alignment in Asymptomatic Subjects. *Global Spine J*, 13(8), 2439-2445. doi:10.1177/21925682221087185
- Roussouly, P., Gollogly, S., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2005). Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(3), 346-353. doi:10.1097/01.brs.0000152379.54463.65
- Roussouly, P., Gollogly, S., Nosedá, O., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2006). The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line: a radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(11), E320-325. doi:10.1097/01.brs.0000218263.58642.ff
- Roussouly, P., & Nnadi, C. (2010). Sagittal plane deformity: an overview of interpretation and management. *Eur Spine J*, 19(11), 1824-1836. doi:10.1007/s00586-010-1476-9
- Safiri, S., Kolahi, A. A., Hoy, D., Buchbinder, R., Mansournia, M. A., Bettampadi, D., . . . Ferreira, M. L. (2020). Global, regional, and national burden of neck pain in the general population, 1990-2017: systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2017. *BMJ*, 368, m791. doi:10.1136/bmj.m791
- Scheer, J. K., Tang, J. A., Smith, J. S., Acosta, F. L., Jr., Protosaltis, T. S., Blondel, B., . . . Ames, C. P. (2013). Cervical spine alignment, sagittal deformity, and clinical implications: a review. *J Neurosurg Spine*, 19(2), 141-159. doi:10.3171/2013.4.Spine12838
- Scheer, J. K., Tang, J. A., Smith, J. S., Acosta, F. L., Jr., Protosaltis, T. S., Blondel, B., . . . International Spine Study, G. (2013). Cervical spine alignment, sagittal deformity, and clinical implications: a review. *J Neurosurg Spine*, 19(2), 141-159. doi:10.3171/2013.4.SPINE12838
- Schünke, M. (2005). *Prometheus - LernAtlas der Anatomie*. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Schwab, F., Lafage, V., Boyce, R., Skalli, W., & Farcy, J. P. (2006). Gravity line analysis in adult volunteers: age-related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(25), E959-967. doi:10.1097/01.brs.0000248126.96737.0f
- Schwab, F., Patel, A., Ungar, B., Farcy, J. P., & Lafage, V. (2010). Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(25), 2224-2231. doi:10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4

- Schwab, J. S., Diangelo, D. J., & Foley, K. T. (2006). Motion compensation associated with single-level cervical fusion: where does the lost motion go? *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(21), 2439-2448. doi:10.1097/01.brs.0000239125.54761.23
- Seo, M., & Choi, D. (2008). Adjacent segment disease after fusion for cervical spondylosis; myth or reality? *Br J Neurosurg*, 22(2), 195-199. doi:10.1080/02688690701790605
- Shimizu, K., Nakamura, M., Nishikawa, Y., Hijikata, S., Chiba, K., & Toyama, Y. (2005). Spinal kyphosis causes demyelination and neuronal loss in the spinal cord: a new model of kyphotic deformity using juvenile Japanese small game fowls. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(21), 2388-2392. doi:10.1097/01.brs.0000184378.67465.5c
- Siegenthaler, W., & Amann-Vesti, B. (2006). *Klinische Pathophysiologie*. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Smith, J. S., Shaffrey, C. I., Lafage, V., Blondel, B., Schwab, F., Hostin, R., . . . Ames, C. P. (2012). Spontaneous improvement of cervical alignment after correction of global sagittal balance following pedicle subtraction osteotomy. *J Neurosurg Spine*, 17(4), 300-307. doi:10.3171/2012.6.Spine1250
- Song, K. J., Choi, B. W., Jeon, T. S., Lee, K. B., & Chang, H. (2011). Adjacent segment degenerative disease: is it due to disease progression or a fusion-associated phenomenon? Comparison between segments adjacent to the fused and non-fused segments. *Eur Spine J*, 20(11), 1940-1945. doi:10.1007/s00586-011-1864-9
- Stagnara, P., De Mauroy, J. C., Dran, G., Gonon, G. P., Costanzo, G., Dimnet, J., & Pasquet, A. (1982). Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 7(4), 335-342. doi:10.1097/00007632-198207000-00003
- Steinhagen, J., Habermann, C. R., Petersen, J. P., Kothe, R., & Ruther, W. (2006). [Imaging in rheumatology. Degenerative diseases of the spine]. *Z Rheumatol*, 65(8), 761-770. doi:10.1007/s00393-006-0077-9
- Tang, J. A., Scheer, J. K., Smith, J. S., Deviren, V., Bess, S., Hart, R. A., . . . Issg. (2015). The impact of standing regional cervical sagittal alignment on outcomes in posterior cervical fusion surgery. *Neurosurgery*, 76 Suppl 1, S14-21; discussion S21. doi:10.1227/01.neu.0000462074.66077.2b
- Vialle, R., Levassor, N., Rillardon, L., Templier, A., Skalli, W., & Guigui, P. (2005). Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am*, 87(2), 260-267. doi:10.2106/JBJS.D.02043
- Villavicencio, A. T., Babuska, J. M., Ashton, A., Busch, E., Roeca, C., Nelson, E. L., . . . Burneikiene, S. (2011). Prospective, randomized, double-blind clinical study evaluating the correlation of clinical outcomes and cervical sagittal alignment. *Neurosurgery*, 68(5), 1309-1316; discussion 1316. doi:10.1227/NEU.0b013e31820b51f3
- Weishaupt, D., Zanetti, M., Boos, N., & Hodler, J. (1999). MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints. *Skeletal Radiol*, 28(4), 215-219. doi:10.1007/s002560050503
- White, A. A., & Panjabi, M. M. (1990). *Clinical biomechanics of the spine*. Philadelphia [u.a.]: Lippincott.
- Williams, J. L., Allen, M. B., Jr., & Harkess, J. W. (1968). Late results of cervical discectomy and interbody fusion: some factors influencing the results. *J Bone Joint Surg Am*, 50(2), 277-286. doi:10.2106/00004623-196850020-00006

- Yang, F., Xiao, D., Zhao, Q., Chen, Z., Liu, K., Chen, S., . . . Feng, G. (2018). Fabrication of a novel whole tissue-engineered intervertebral disc for intervertebral disc regeneration in the porcine lumbar spine. *RSC Advances*, 8, 39013-39021. doi:10.1039/C8RA06943C
- Yang, J. J., Yu, C. H., Chang, B. S., Yeom, J. S., Lee, J. H., & Lee, C. K. (2011). Subsidence and nonunion after anterior cervical interbody fusion using a stand-alone polyetheretherketone (PEEK) cage. *Clin Orthop Surg*, 3(1), 16-23. doi:10.4055/cios.2011.3.1.16
- Yip, C. H., Chiu, T. T., & Poon, A. T. (2008). The relationship between head posture and severity and disability of patients with neck pain. *Man Ther*, 13(2), 148-154. doi:10.1016/j.math.2006.11.002
- Yoganandan, N., Pintar, F. A., Stemper, B. D., Baisden, J. L., Aktay, R., Shender, B. S., . . . Laud, P. (2006). Trabecular bone density of male human cervical and lumbar vertebrae. *Bone*, 39(2), 336-344. doi:10.1016/j.bone.2006.01.160
- Yue, W. M., Brodner, W., & Highland, T. R. (2005). Long-term results after anterior cervical discectomy and fusion with allograft and plating: a 5- to 11-year radiologic and clinical follow-up study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(19), 2138-2144. doi:10.1097/01.brs.0000180479.63092.17