

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Klinik für Spinale Chirurgie
der Schön Klinik Hamburg Eilbek

Chefärzte: Prof. Dr. med. Luca Papavero
PD Dr. med. Ralph Kothe

**Multisegmentale degenerative zervikale Myelopathie:
Klinische und radiologische Evaluation von vier Operationstechniken**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von

Janina Isabell Bergmann aus Hannover

Hamburg 2021

Angenommen von der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

am: 04.08.2021

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende:

Prof. Dr. Sven Eicker

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter:

Prof. Dr. Luca Papavero

Inhaltsverzeichnis

1. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
2. EINLEITUNG.....	8
3. GRUNDLAGEN	10
3.1. ANATOMIE DER HALSWIRBELSÄULE	10
3.2. ZERVIKALE SPINALKANALSTENOSE.....	11
3.3. DEGENERATIVE ZERVIKALE MYELOPATHIE (DCM)	12
3.3.1. <i>Klinisches Bild</i>	12
3.3.2. <i>Bildgebende Diagnostik</i>	14
3.3.3. <i>Therapie</i>	20
4. MATERIAL UND METHODEN	22
4.1. ÜBERSICHT	22
4.2. PATIENTENKOLLEKTIV	24
4.3. KLINISCHE SCORES.....	25
4.3.1. <i>Europäischer Myelopathie Score (EMS)</i>	25
4.3.2. <i>Neck-Disability-Index (NDI)</i>	27
4.3.3. <i>EQ-5D</i>	28
4.3.4. <i>Numerische Analogskala</i>	30
4.4. KOMPLIKATIONSERFASSUNG.....	30
4.5. PRÄOPERATIVE BILDGEBUNG.....	31
4.6. OPERATIVE TECHNIKEN.....	31
4.6.1. <i>Ventrale Dekompressionsverfahren</i>	31
4.6.2. <i>Dorsalen Dekompressionsverfahren</i>	36

4.7.	POSTOPERATIVE NACHBEHANDLUNG	42
4.8.	FXA-AUSWERTUNG DER RÖNTGENAUFNAHMEN	42
5.	ERGEBNISSE	47
5.1.	KLINISCHE AUSWERTUNG.....	47
5.2.	ERGEBNISSE DER FXA-ANALYSE	61
5.3.	MRT AUSWERTUNG	71
5.4.	KOSTENANALYSE	77
6.	DISKUSSION	81
7.	ZUSAMMENFASSUNG.....	90
8.	LITERATURVERZEICHNIS	93
9.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	100
10.	TABELLENVERZEICHNIS.....	103
11.	DANKSAGUNG.....	104
12.	LEBENS LAUF	105
13.	EIDESSTÄTTLICHE VERSICHERUNG	106

Anmerkung:

Zur einfacheren Lesbarkeit wird im folgenden Text das männliche Geschlecht für beide Geschlechter verwendet.

1. Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
ACDF	Anterior Cervical Discectomy and Fusion
ACCF	Anterior Cervical Corpectomy and Fusion
AE	Adverse Event
a.p.	anterior posterior
ax.	axial
BSV	Bandscheibenvorfall
CT	Computertomographie
DCM	Degenerative Cervical Myelopathy
DTI	Diffusion Tensor Imaging
Eb.	Ebene
EMS	European Myelopathy Score
EQ-5D	European Quality of Life 5 Dimensions
FA	Fractional Anisotropy
FXA	Functional X-Ray Analysis
HWS	Halswirbelsäule
lat.	lateral
Lig.	Ligamentum
LOS	length of stay
LPL	Laminoplastie
LPUNIL	Laminoplastie und unilaterale Stabilisierung

LX	Laminektomie
M.	Musculus
MRT	Magnet Resonanz Tomographie
MEPs	motorisch evozierte Potentiale
N.	Nervus
NAS	Numerische Analogskala
NDI	Neck Disability Index
OPLL	Ossification Posterior Longitudinal Ligament (Verknöcherung des hinteren Längsbandes)
PEEK	Poly-ether-ether-ketone
ROM	Range of Motion
RR	Recovery Rate
sag.	sagittal
SD	Standard Deviation
SEPs	sensibel evozierte Potentiale
SVA	sagittale vertikale Achse
vgl.	Vergleich

2. Einleitung

Degenerative Prozesse der Halswirbelsäule (HWS) beinhalten Bandscheibenvorfälle, diskoligamentäre Instabilitäten und hypertrophen Knochenanbau. Sie können die Spinalnerven (zervikale Radikulopathie) oder das Rückenmark (zervikale Myelopathie) bedrängen.

Die degenerative zervikale Myelopathie (Degenerative Cervical Myelopathy, DCM) ist die häufigste degenerative Erkrankung der Halswirbelsäule bei Patienten über 55 Jahre. Aufgrund der zunehmenden Lebenserwartung und der Verschiebung der Alterspyramide ist in Zukunft mit einer Zunahme von Patienten mit einer DCM zu rechnen (Kalsi-Ryan et al., 2017; Bartels, 2013).

Konservative Therapien beheben nicht die Ursachen, die das Rückenmark bedrängen. Die Indikation zur Operation und der Operationszeitpunkt sollten nicht ausschließlich anhand der Bildgebung, sondern unter gleichzeitiger Berücksichtigung des klinischen Befundes und dessen zeitlichen Verlaufes erfolgen. Differentialdiagnosen müssen zuvor abgeklärt werden.

Die Dekompression des/der stenosierenden Segmentes/e sollte als Mindestziel die Progredienz der bestehenden Symptome verhindern. Darüber hinaus wird eine partielle oder sogar vollständige Rückbildung der Symptomatik angestrebt.

Zusätzlich zu dem richtigen Zeitpunkt für den Eingriff ist die Wahl der geeigneten operativen Technik von entscheidender Bedeutung. Sie sollte folgende Faktoren berücksichtigen:

- **Klinischer Befund:** Alter, allgemeine Nebenerkrankungen und knochenspezifische Komorbiditäten wie Osteoporose, rheumatoide Arthritis und ankylosierende Spondylitis.
- **Bildgebung:** Ausprägung und Lokalisation der Stenose, Anzahl der betroffenen Segmente, eventuelle segmentale Instabilitäten, das sagittale Profil der HWS.

In der Klinik für Spinale Chirurgie wird die Entscheidungsfindung durch einen diagnostischen Algorithmus (7-Letter-Code) unterstützt, der die bildgebenden und klinischen Parameter gewichtet und einen operativen Zugang empfiehlt (Papavero et al., 2020). Der Algorithmus wird seit 6 Jahren bei Patienten mit DCM angewendet.

Für die Behandlung der DCM stehen mehrere operative Techniken zur Verfügung. Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen der alleinigen Erweiterung des Spinalkanals (ventrale Dekompression, Laminoplastie oder Laminektomie) und einer ggf. zusätzlichen Stabilisierung.

Operative Zugänge sind ventral (Anterior Cervical Decompression Fusion (ACDF); Anterior Cervical Corpectomy Fusion (ACCF) und dorsal (Laminoplastie (LPL); Laminoplastie mit unilateraler Stabilisierung (LPUNIL); Laminektomie (LX). Seltene Befundkonstellationen erfordern einen kombinierten (360°) Zugang. Die Auswahl des operativen Verfahrens ist abhängig von der klinischen und bildgebenden Befundkonstellation und von der persönlichen Erfahrung des Operateurs.

In dieser Arbeit werden die klinischen und radiologischen Ergebnisse von vier Operationstechniken zur Behandlung der multisegmentalen DCM (LPL, LX, LPUNIL, 360°) nach mindestens 1 Jahr analysiert (Range 12 - 64 Monate, Median 21 Monate).

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Unterscheiden sich die klinischen Ergebnisse in Abhängigkeit vom operativen Vorgehen?
- Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Techniken auf die Dekompression des subaxialen Spinalkanals, das sagittale Profil und die Beweglichkeit der HWS?

3. Grundlagen

3.1. Anatomie der Halswirbelsäule

Im Seitenprofil weist die HWS eine physiologische Krümmung (Lordose) auf. Die HWS-Lordose unterliegt einer natürlichen Variabilität und ist abhängig von Alter und Geschlecht. Man spricht vom sogenannten sagittalen „Profil“ der Halswirbelsäule.

Die HWS stellt den beweglichsten Wirbelsäulenabschnitt dar. An der Rotation der Halswirbelsäule sind zu etwa 60% die beiden kranialen Kopfgelenke beteiligt und das C1/C2 Segment trägt allein etwa 90% dazu bei. Das C0/C1 Segment trägt im Wesentlichen zur Flexion und Extension bei.

Segmentale Degenerationsprozesse der HWS finden sich zumeist in den Bewegungsabschnitten C5/6 und C6/7 (Payer et al., 2009). Der Bereich zwischen dem Segment C6/7 sowie Th3 wird als zerviko-thorakaler Übergang bezeichnet.

Die Bandscheiben zwischen den zervikalen Wirbelkörpern dienen der gleichmäßigen Druckverteilung von axial einwirkenden Kräften auf die angrenzenden Grund- und Deckplatten. Ihre Elastizität ist bedingt durch das funktionelle Zusammenspiel des gallertartigen Nucleus pulposus und dem umgebenden Anulus fibrosus. Eine nervale und/oder vaskuläre Versorgung besteht hier nicht, weshalb die Versorgung der Bandscheibe mittels Diffusion erfolgt (Lestini et al., 1989). Da der dorsale Anteil des Anulus fibrosus und des Lig. longitudinale anterius von geringerer Festigkeit sind als der ventrale Anteil, kommt es hier vermehrt zu Protrusionen und Prolapsen, wodurch eine Einengung des Spinalkanals resultieren kann (Verbiest et al., 1966). Das Lig. longitudinale anterius und das Lig. longitudinale posterius stabilisieren die Bandscheibe jeweils von ventral und von dorsal.

Der erste Spinalnerv tritt zwischen dem Os occipitale und dem Atlas aus und wird zu den nachfolgenden sieben Spinalnerven addiert. Somit finden sich im Bereich der HWS bei *sieben* Wirbelkörpern *acht* Spinalnerven, die, jeweils paarig vom Myelon ausgehend, direkt über dem Pedikel des jeweiligen Segments horizontal durch das Foramen intervertebrale austreten (Lang, 1991). Aufgrund von ventralen Anastomosen zwischen den randständigen

Fila radicularia und den proximal und distal davon liegenden Nervenwurzeln kann es zu einer Überlagerung von Dermatomen und Myotomen in der klinischen Symptomatik kommen. Am Wirbelkörper findet sich an beiden Seiten der Unkovertebralfortsatz (Proc. uncinatus). Dieser bildet mit dem darüber liegenden Wirbelkörper das Unkovertebralgelenk. Im Zwischenwirbelgelenk (Facettengelenk) artikulieren jeweils beidseits der Proc. articularis inferior des oberen und der Proc. articularis superior des unteren Wirbels.

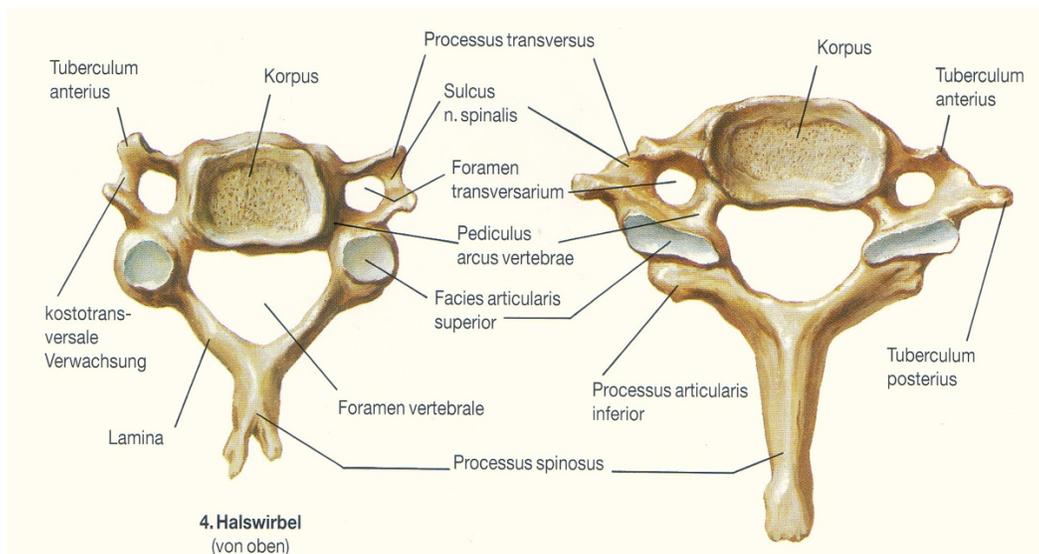


Abb. 1: Netter Frank H: Farbatlanten der Medizin – Bd. 7. Bewegungsapparat I. Thieme: Stuttgart New York, S. 9 - 13 (1992)

3.2. Zervikale Spinalkanalstenose

Die zervikale Spinalkanalstenose bezeichnet eine Einengung des zentralen Spinalkanals (zentrale Spinalkanalstenose) im Bereich der HWS. Eine Verengung der Neuroforamina wird als Neuroforamenstenose bezeichnet. Die Einengung kann durch disko-ligamentäre oder knöcherne Strukturen sowie kombiniert verursacht werden und ein oder mehrere Segmente betreffen.

Im ostasiatischen Raum tritt gehäuft eine Verkalkung des hinteren Längsbandes (Ossification Posterior Longitudinal Ligament, OPLL) auf, die eine längerstreckige Spinalkanalstenose verursacht. Die familiäre Häufung von Veränderungen im Collagen-alpha-2 (x1) - Gen ist die wahrscheinliche Ursache (Maeda et al., 2001).

Die Degeneration der Bandscheibe bedingt die reaktive Bildung von Knochenanbauten am Wirbelkörper und die Verdickung der bindegewebigen (Ligament-) Strukturen. Dadurch können sowohl Spinalnerven als auch das Myelon komprimiert werden.

Die Volumenabnahme der degenerierten Bandscheibe kann zu einer zunächst ventral betonten Höhenreduzierung des Zwischenwirbelraumes führen. Der Verlust der physiologischen Halslordose führt zur kyphotischen Fehlstellung mit Verlagerung des Rückenmarkes nach ventral (McCormick et al., 2003).

Das Myelon kann durch dorsale Spondylophyten bedrängt werden. Diese Knochenanbauten sind eine Reaktion auf die vermehrte Druckbelastung der dorsalen knöchernen Strukturen, wie auch die hypertrophe Degeneration der Procc. uncinati (Uncovertebralarthrose) und der Zwischenwirbelgelenke (Spondylarthrose) sowie des Lig. flavums (Kim, 1993).

Der degenerative Umbau eines oder mehrerer Bewegungssegmente(s) führt zu einer Instabilität der disko-ligamentären Strukturen und zu einem Gleiten des kranialen Wirbelkörpers nach ventral (Ventrolisthese) oder nach dorsal (Retrolisthese) (Hayashi et al., 1987).

Das Zusammenspiel der degenerativen Prozesse kann zu einer progredienten Einengung des Spinalkanals mit zunehmender Kompression des Myelons führen: das ist die anatomische Grundlage der DCM (Benzel, 1996).

3.3. Degenerative zervikale Myelopathie (DCM)

3.3.1. Klinisches Bild

Die DCM ist die häufigste Erkrankung der HWS bei Menschen über 55 Jahren. Ursächlich finden sich mono- oder mehrsegmental Einengungen des zervikalen Spinalkanals (zervikale

Spinalkanalstenose), auch in Kombination mit degenerativen Instabilitäten, die eine Kompression des Myelons und dessen vaskulärer Versorgung bewirken.

Die Schädigung der motorischen Vorderhornzellen kann eine schlaffe Parese der nachgeschalteten Muskulatur verursachen (Keirstead et al., 1999).

Wenn die Weiterleitung von extero- und propriozeptiven Impulsen zum Gehirn infolge einer Beeinträchtigung der Hinterstrangbahnen reduziert wird, sind das ipsilaterale feine Berührungs-, das Druck- und Vibrationsempfinden kompromittiert. Klinisch zeigt sich dies in einem breitbasig-ataktischen Gangbild mit Fallneigung.

Radikuläre Schmerzen mit motorischen und/oder sensorischen Ausfällen und Atrophien der Arm- und Handmuskeln sind hingegen Ausdruck einer Wurzelkompression im Neuroforamen (Neuroforamenstenose).

Obwohl ca. 75% der Patienten über 65 Jahren bildmorphologisch degenerative Veränderungen der HWS zeigen, tritt die klinische Myelopathie-Symptomatik nur bei einem kleinen Teil von ihnen auf (Kothe, 2019): Selten kann eine bildgebend manifeste zervikale Stenose sogar asymptomatisch sein.

Die Extension des Kopfes und/oder segmentale Instabilitäten können bei bestehender zervikaler Stenose zu repetitiven Mikrotraumata des Myelons mit Schädigung der Myelinscheiden führen. Es resultiert eine, häufig nur bedingt reversible, akute Dekompensation der Myelopathie. Zusätzlich führt die Beeinträchtigung der Mikrozirkulation zu einem Ödem des Myelons. Auch entzündliche Prozesse spielen eine Rolle (Beattie et al., 2011). Der Verlauf der DCM ist sehr heterogen und schwer vorhersehbar. Eine langsame intermittierende Zunahme der Symptome ist häufig (Clarke et al., 1956; Rowland et al., 1992; Voskuhl et al., 1990).

Die rasche Progredienz oder die Dekompensation der Symptomatik infolge akuter traumatischer Kompression des Myelons bei vorbestehender Stenose sind ebenfalls bekannt.

Das klinische Bild der DCM beginnt meist diffus mit nicht dermatombezogenen Dysästhesien, Verschlechterung der Fingerfeinmotorik sowie einer progredienten Gangunsicherheit bei Dunkelheit (Spillane et al., 1952).

Im fortgeschrittenen Stadium treten infolge der Schädigung der langen Pyramidenbahnen spastische Muskeltonuserhöhung, Hyperreflexie der unteren Extremitäten oder Kloni auf. Das zunehmend breitbasige und ataktische Gangbild ist Ausdruck einer zunehmenden Schädigung der Hinterstrangbahnen. Die Verschlechterung der Fingerfeinmotorik äußert sich im Alltag als krakeliges Schriftbild oder in der Schwierigkeit Bluse oder Hemd zuzuknöpfen.

Die klinische Diagnostik beginnt mit einer ausführlichen Anamnese der beklagten Beschwerden und ihres zeitlichen Verlaufes. Es folgt die klinische Untersuchung: Die Erhebung von Nacken- und von einer Nervenwurzel zuzuordnenden (= radikulären) Armschmerzen sowie deren Intensität anhand der numerischen Analogskala (NAS), kann mit einem unsicheren Seiltänzer- und Blindgang hinweisend auf eine Myelopathie sein. In der Regel ist die DCM jedoch schmerzfrei. Die Reflexe können gesteigert sein.

3.3.2. Bildgebende Diagnostik

Die Untersuchung der ersten Wahl ist die Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) der HWS. Sagittale und axiale Schichten mit T1 und T2 Gewichtung zeigen die Kompression des Myelons. Deren Ausmaß wird durch die Klassifikation von Kang et al. (Kang et al., 2011) beschrieben.

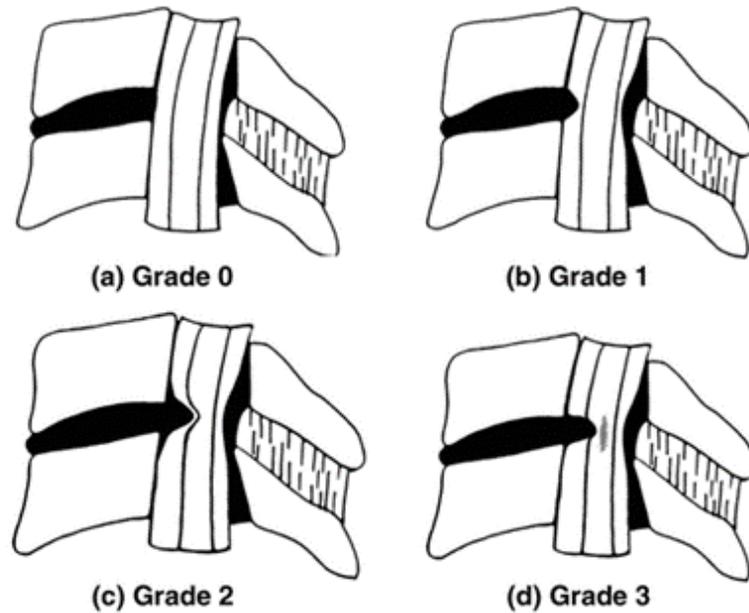
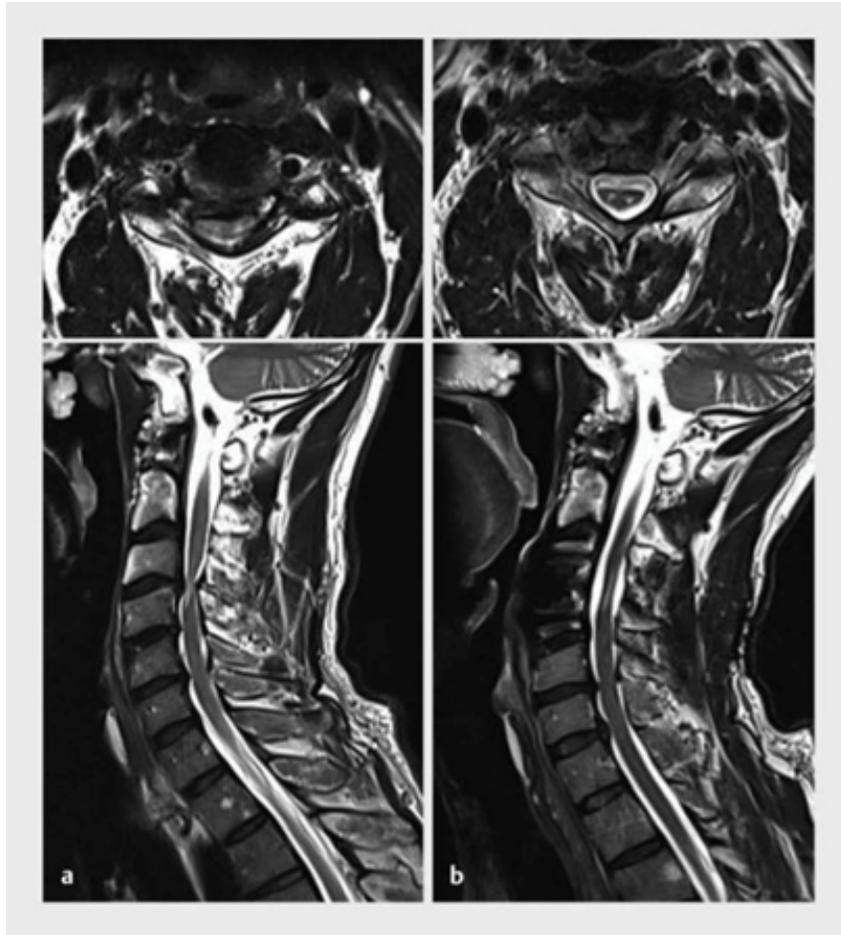


Abb. 2: Klassifikation der zervikalen Stenose (Kang et al., AJR, 2011)

Tabelle 1: Stadien der zervikalen Myelopathie nach Kang et al.

Kang	T2-Gewichtung MRT
Grad 0	keine Stenose (subarachnoidaler Raum < 50 % verschmälert)
Grad 1	subarachnoidaler Raum > 50 % verschmälert
Grad 2	Myelonverdrängung/ -kompression
Grad 3	Signalveränderung im Myelon

Das hyperintense Signal im Myelon in den axialen T2 gewichteten Aufnahmen, das sogenannte „Cobra Sign“ (Abb. 3) ist vermutlich Ausdruck eines intramedullären Ödems. Eine entsprechende Signalhypointensität in den T1 gewichteten Aufnahmen gilt als prognostisch negatives Zeichen (Epstein et al., 2018).



*Abb. 3: „Cobra sign“. Ventro-dorsale Dekompression und Fusion C3/ C4 a) MRT präoperativ sagittal und axial. b) MRT 1 Jahr postoperativ sagittal und axial.
(Kothe et al., Orthopädie und Unfallchirurgie Up2date, 2019)*

Neben der Kompression des Myelons können in der MRT auch neuroforaminale Engen (Neuroforamenstenosen) zur Darstellung kommen, die das klinische Mischbild von zervikaler Myelopathie mit Radikulopathie erklären.

Zervikale Computertomographie (CT)

Die HWS-CT weist besonders detailgenau knöcherner Bedrängungen der Neurostrukturen nach. Z.B.: die knöchern bedingte neuroforaminale Enge, die Verkalkung des hinteren Längsbandes (OPPL) oder die (Teil-)Verkalkung eines Bandscheibenvorfalles (Abb. 4).

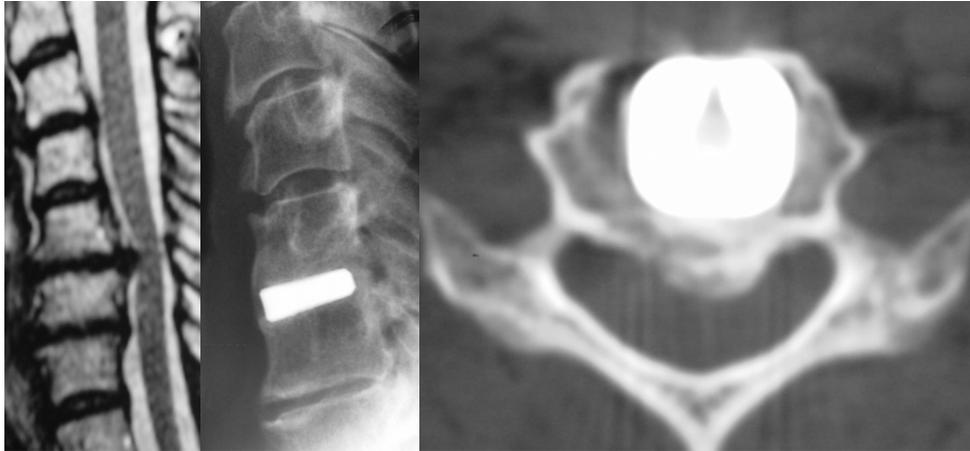


Abb. 4: Klinischer Fall: (links) im MRT wurde ein BSV C5/C6 als Ursache der Myelopathie vermutet. Auf eine zusätzliche präoperative CT wurde verzichtet. (Mitte): Das Bandscheibenfach wurde ausgeräumt und ein Titan-Cage eingebracht. (rechts): Infolge der Persistenz der Symptomatik wurde postoperativ eine CT durchgeführt, die eine vollständige Verkalkung des BSV nachwies.

Röntgenaufnahme der HWS in zwei Ebenen mit Funktionsaufnahmen in Flexion und Extension

Für die präoperative Planung sind die Beurteilung des sagittalen Profils, der Beweglichkeit der HWS und eventueller segmentaler Instabilitäten unverzichtbar. Obwohl die native Röntgendiagnostik obsolet wirken kann, hat sie den unschätzbaren Vorteil, dass sie zeit- und kostengünstig die biomechanische Belastung der HWS widerspiegelt.

Diffusion Tensor Imaging (DTI)

Die spezielle Software für moderne MRT-Geräte analysiert die Diffusion von Wassermolekülen (Fractional Anisotropy, FA) im Rückenmark. Dies kann insbesondere bei Patienten mit milden Myelopathiesymptomen als Diagnostik hilfreich sein, da bereits Veränderungen gezeigt werden, die in der normalen T2 Gewichtung noch nicht als hyperintenses Signal zur Darstellung kommen (Abb. 5-7, Schöller et. al., 2020).

Das Verfahren ist aufwendig und kostenintensiv, so dass es noch nicht standardmäßig Anwendung findet. (Guan et al., 2015)

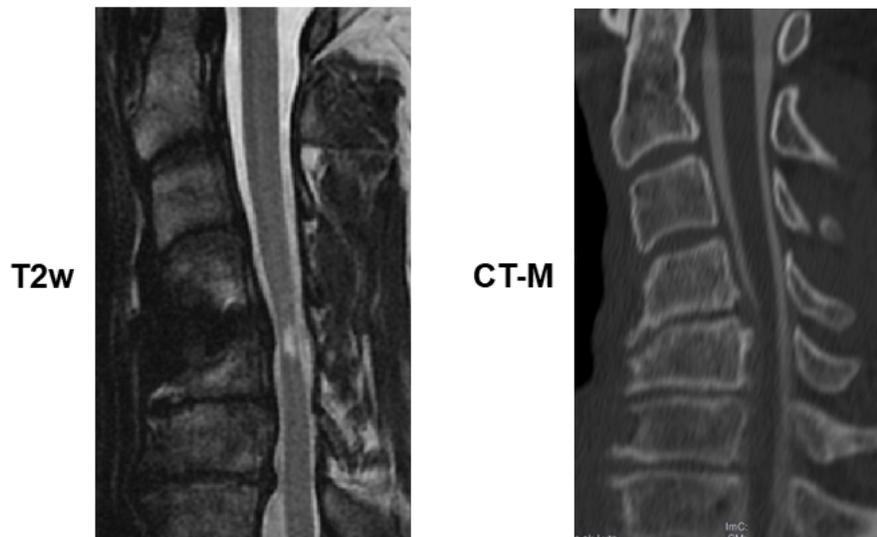


Abb. 5: Sagittales T2-gewichtetes HWS-MRT und CT präoperativ

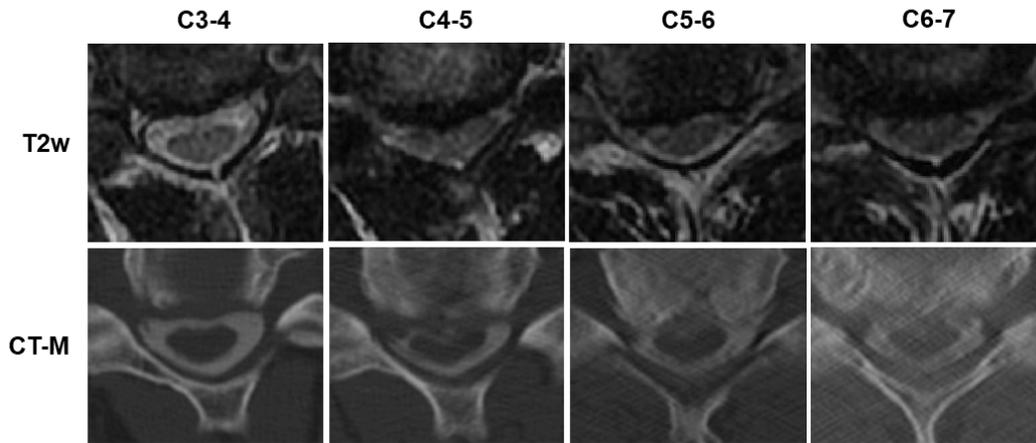
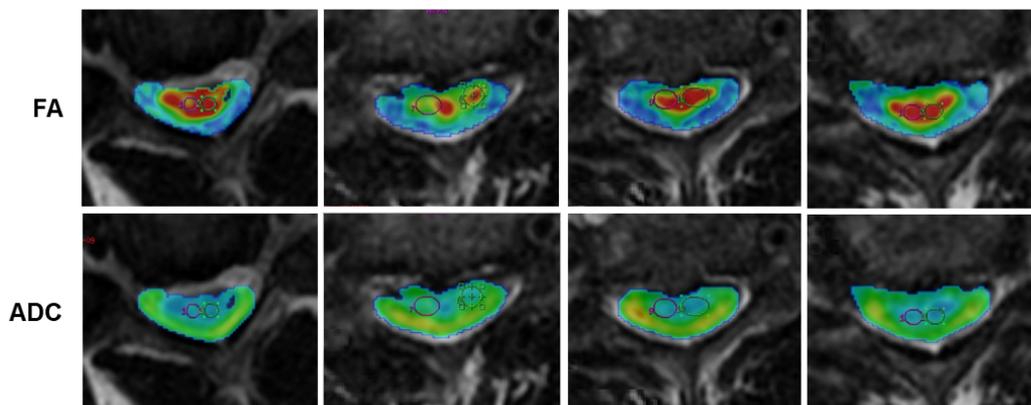


Abb. 6: Axial T2 gewichtetes MRT und CT der Segmente C3/4, C4/5, C5/6 und C6/7 eines 57-jährigen Patienten mit zervikaler Stenose C4/5



*Abb. 7: Axiales DTI der Segmente C3/4, C4/5, C5/6 und C6/7
Interessanterweise sieht man trotz im MRT moderater/ geringer Stenose (C3-4; C6-7) im DTI bereits eine deutliche Signalanhebung.*

Elektrophysiologische Diagnostik

Die Untersuchung mittels motorisch evozierter Potentiale (MEP's) sowie sensibel evozierter Potentiale (SEPs) ermöglicht die Abgrenzung der DCM zu ihren Differentialdiagnosen: zerebrale Mikroangiopathien, funikuläre Myelose, chronische Myelitiden, Multiple Sklerose

u.a.. Anhand der Messung der Reizleitung kann zwischen einer zentralen und einer peripheren Schädigung unterschieden werden. Die Unterscheidung einer chronischen von einer akuten Schädigung ist sowohl für die Therapieempfehlung als auch als prognostischer Faktor relevant.

3.3.3. Therapie

Konservative Therapie

Bei Patienten mit beginnender oder geringer klinischer Symptomatik ist ein konservatives Vorgehen zunächst gerechtfertigt. Dieses sollte von klinischen und bildgebenden Verlaufskontrollen in Abständen von 9-12 Monaten begleitet werden (Milligan et al., 2019), um abhängig von einer Progredienz der Symptome die Indikation zur operativen Empfehlung erneut zu prüfen.

Neben physikalischer Behandlung und Physiotherapie mit dem Ziel des Muskelaufbaus zur Stabilisierung der HWS kann die Schmerztherapie (Analgetika, Infiltrationen) eine Beschwerdelinderung erzielen. Eine kurzzeitige Ruhigstellung mit einer weichen Halskrause kann hilfreich sein (Kato et al., 2016)

Um Komplikationen vorzubeugen, sollten Manualtherapie oder zervikale Traktion ebenso wie Risikosportarten (Kontaktsport etc.) vermieden werden (Milligan et al., 2019).

Operative Therapie

In der Planung sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

1. *Der "richtige" Zeitpunkt:* Bei seit langem unveränderter und/oder bei milder Symptomatik, insbesondere bei betagten Patienten mit zahlreichen Komorbiditäten, kann zunächst das konservative Vorgehen mit klinischer und bildgebender Verlaufsbeobachtung empfohlen werden. Der Patient muss über Vor- und Nachteile dieser Option aufgeklärt werden und ihr zustimmen.

2. *Das perioperative Risiko:* Aufgrund von Begleiterkrankungen des Patienten wie z.B. einem Diabetes Mellitus und einer ggf. notwendigen komplexen Operationstechnik zur Dekompression einer zervikalen Enge, ist dies kritisch mit dem Patienten zu erörtern und kann die Wahl der Therapie beeinflussen (Tetreault et al., 2015).
3. *Prognostische Faktoren:* Es ist günstig, wenn der Patient jünger, die klinische Symptomatik erst seit Kurzem besteht und wenige Komorbiditäten vorhanden sind (Tetreault et al., 2015). Jedoch ist das Alter des Patienten *allein* kein negativer Faktor (Machino et al., 2016). Signalhyperintensitäten in den T2 gewichteten MRT-Schichten können prognostisch relevant sein. Für den postoperativen Verlauf sind scharf begrenzte Signalhyperintensitäten eher ungünstig als fehlende oder flauere Signalauffälligkeiten (Chen et al., 2001; Suri et al., 2003). Dies gilt umso mehr für Signalhypointensitäten in den T1 gewichteten Bildern.
4. *Die Progredienz der Myelopathie-Symptomatik:* Die Verschlechterung der Fingerfeinmotorik und/oder des Gangbildes sowie elektrophysiologische Hinweise für eine zentrale Reizleitungsstörung erfordern eine elektive operative Therapie. Die rasche Progredienz der Myelopathie-Symptomatik, evtl. auch im Sinne einer sich entwickelnden Querschnittssymptomatik, stellt eine absolute und dringliche Operationsindikation dar.

Zusammenfassend: Auch wenn das Ziel, den präoperativen neurologischen Status zu erhalten oder zu verbessern, nur durch die Dekompression des Myelons erreicht werden kann, ist die Indikation zur operativen Therapie unter Berücksichtigung von Alter, Komorbiditäten, Dauer und insbesondere Progredienz der klinischen Symptomatik zu stellen.

4. Material und Methoden

4.1. Übersicht

Für die vorliegende Studie wurden retrospektiv die Daten von 94 Patienten ausgewertet, die zwischen Januar 2014 und Juni 2018 aufgrund multisegmentaler DCM operiert wurden und eine Mindestbeobachtungszeit von 1 Jahr (Range 12 – 64 Monate, Median 21 Monate) hatten.

Einschlusskriterien waren: Alter > 18 Jahre; symptomatische DCM infolge einer zentralen, mono- oder mehrsegmentalen Stenose des HWS-Spinalkanals.

Ausschlusskriterien waren: Revisionseingriffe, die Beteiligung des kranio-zervikalen und/oder zerviko-thorakalen Überganges und die rheumatoide Arthritis.

Die präoperative Diagnostik umfasste Anamnese, klinische und, falls indiziert, elektrophysiologische Untersuchung sowie die bildgebende Trias: MRT, CT und Röntgen-Diagnostik der HWS.

Als OP-Techniken standen die Laminoplastie (LPL), die Laminoplastie mit unilateraler Fusion (LPUNIL), die Laminektomie mit bilateraler Fusion (LX) sowie die 360°-Versorgung als Kombination von ACDF/ACCF mit Laminektomie und dorsaler Fusion (360°) zur Verfügung. Drei erfahrene Operateure führten die Eingriffe durch.

Folgende Parameter wurden analysiert:

1. Intraoperative Parameter (z.B. OP-Zeit, Blutverlust etc.)
2. Stationäre Verweildauer
3. Komplikationen. Die Erfassung und Klassifikation der Komplikationen erfolgten standardmäßig über ein Register.
4. Neurologisches Outcome: anhand eines validierten Myelopathie-Scores (Europäischer Myelopathie Score, EMS) sowie die hieraus zu errechnende “Recovery Rate” (RR) nach Hyabashi (Kato et al., 2015) erfolgte die prä- und postoperative neurologische Bewertung.

Anhand standardisierter Fragebögen wurden prä- und postoperativ folgende Outcome-Parameter erhoben: EQ-5D, NDI, NAS Neck, NAS Arm.

Die Erfassung der Daten wurde im klinikinternen Register (Schön Klinik Wirbelsäulen Register) prospektiv durchgeführt. Die Auswertung erfolgte präoperativ und zur finalen Follow-Up Untersuchung (mindestens aber 1 Jahr postoperativ).

Anlässlich der ambulanten Nachuntersuchungen drei und mindestens 12 Monate postoperativ, wurden die klinischen Parameter dokumentiert und HWS-Röntgenaufnahmen (in 2 Ebenen und Flexion/ Extension) sowie eine MRT-Untersuchung durchgeführt.

Das Ausmaß der Dekompression des Myelons konnte bei 79 Patienten in einer postoperativen MRT 3 und mindestens 12 Monate nach dem Eingriff ausgewertet werden. Unmittelbare postoperative Artefakte wurden so ausgeschlossen. Zwei unabhängige Untersucher bestimmten den sagittalen Durchmesser des Spinalkanals in der medianen sagittalen T2 gewichteten Schicht in Höhe der Bandscheibenfächer C3/4, C4/5, C5/6 und C6/7.

Die postoperative Beurteilung des sagittalen Profils und der Beweglichkeit der HWS erfolgte bei 92 Patienten anhand von Röntgenbildern (präoperativ, postoperativ und Follow-Up nach mindestens 1 Jahr). Die 736 Röntgenbilder wurden mit einer speziellen Software (Functional X-Ray Analysis (FXA, Raylytic medical data automation, Raylytic GmbH, Leipzig) elektronisch vermessen und ausgewertet. Das medizinische Softwarepaket analysiert und quantifiziert mit hoher Genauigkeit und Reliabilität Messparameter von Röntgenaufnahmen. Es wurden folgende Parameter erhoben: Range of Motion (ROM) C3-6, C2-7 COBB Angle, C2-7 hintere Tangente Methode, Lordose C0-C2, C1/2 Winkel, C1-7 Sagittale Vertikale Achse (SVA), C2-7 SVA sowie C7 Slope.

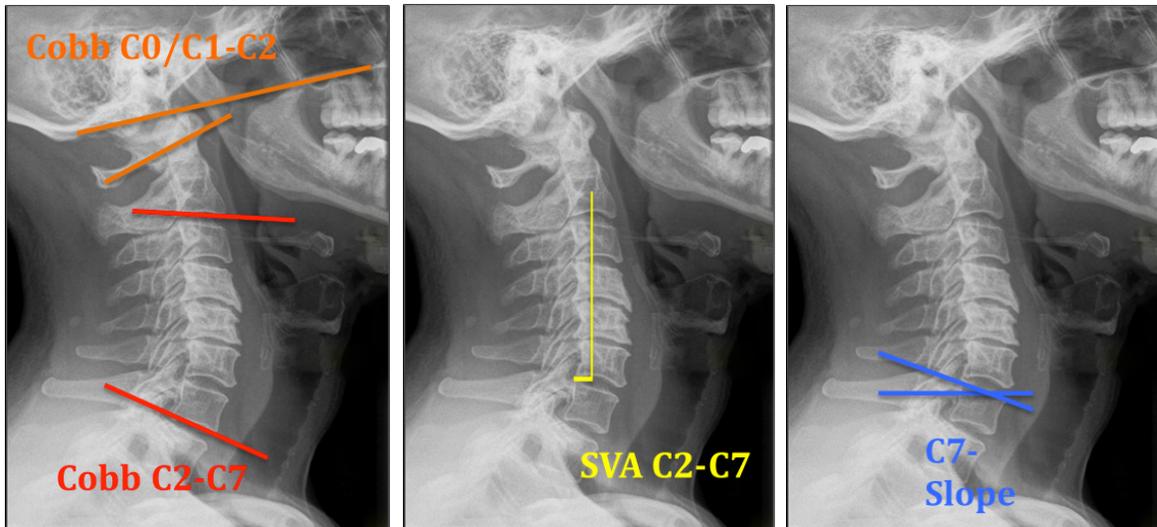


Abb. 8: Parameter für Sagittale Balance

Die statistische Auswertung der MRT-Daten erfolgte im Science Office der Schön Kliniken in Zusammenarbeit mit Dr. Holger Aust (Databraineo, Bonn). Die statistische Auswertung der FXA-Datensätze erfolgte durch Frank Trautwein (ACES GmbH, Leipzig).

4.2. Patientenkollektiv

In der vorliegenden Studie wurden 94 Patienten mit klinisch und bildmorphologisch nachgewiesener DCM aufgrund einer zervikalen Spinalkanalstenose inkludiert. Die Aufteilung auf die vier Operationstechniken ergab folgende Patientenzahlen:

- 1) LX: n=28
- 2) LPL: n=22
- 3) 360°: n=22
- 4) LPUNIL: n=22

Der Altersdurchschnitt betrug 67 Jahre (Range 49 – 87 Jahre). Es wurden 40 Frauen und 54 Männer eingeschlossen.

Bei 79 Patienten konnte das Ausmaß der Dekompression des Myelons anhand der prä- und postoperativen MRT-Bilder bestimmt werden.

Die mit standardisierten Fragebögen erhobenen klinischen Daten wurden mit Zustimmung der Patienten präoperativ, bei Entlassung sowie in definierten Follow-Up Intervallen (mindestens 12 Monate postoperativ) in dem klinikeigenen Register dokumentiert.

4.3. Klinische Scores

Scores dokumentieren das funktionelle/klinische Operationsergebnis. Es handelt sich um drei standardisierte und im klinischen Alltag häufig angewendete und gut vergleichbare Messmethoden. Die Fragebögen wurden in vielen Veröffentlichungen auf ihre Reliabilität und Validität untersucht und in Studien von Halswirbelsäulenpatienten angewendet. (Vernon et al., 1991; Young et al., 2010).

Die Scores wurden präoperativ und zu einem bestimmten Follow-Up Zeitpunkt erhoben.

Nachfolgend eine Erläuterung der Scores.

4.3.1. Europäischer Myelopathie Score (EMS)

Der EMS besteht aus 5 Items mit unterschiedlicher Punktgewichtung, so dass insgesamt ein Score zwischen 5 und 18 Punkte möglich ist. Die Items gliedern sich wie folgt:

1. Funktionen des ersten motorischen Neurons (Gang) (1-5 Punkte)
2. Funktionen des ersten motorischen Neurons und des afferenten Systems (Blasen-/Darmfunktion) (1-3 Punkte)
3. Funktionen des zweiten motorischen Neurons (1-4 Punkte)
4. Funktionen der Hinterstränge (Propriozeption und Koordination) (1-3 Punkte)
5. Dorsale Wurzeln (segmental radikuläre Parästhesie / Schmerzen) (1-3 Punkte)

Der EMS wurde präoperativ sowie zu den Follow-Up Untersuchungen erhoben, um den Verlauf der klinischen Symptome zu dokumentieren.

Jeder Patient füllte den Fragenbogen selbstständig aus. Pro Frage war nur eine Antwort anzukreuzen, welcher ein Punktwert zugeordnet wurde. Alle Punktwerte wurden addiert und ermöglichten in ihrer Summe die Einteilung des Schweregrades der Myelopathie.

Der Europäische Myelopathie Score (EMS):	
Funktionen des ersten motorischen Neurons(Gang)	Punkte
Unfähigkeit zu gehen, auf Hilfe angewiesen	1
Auf ebenem Boden nur mit Gehhilfe / Unterstützung	2
Treppensteigen nur mit Gehhilfe / Unterstützung	3
Unsicherer Gang, Gangbild plump erscheinend	4
Unauffälliges Gangbild	5
Funktionen des ersten motorischen Neurons und des afferenten Systems (Blasen-/Darmfunktion)	Punkte
Überlaufblase, keine Kontrolle	1
Unvollständige Entleerung und gestörte Frequenz	2
Normale Blasen- und Darmfunktion	3
Funktionen des zweiten motorischen Neurons	Punkte
Handschrift / Essen mit Besteck nicht möglich	1
Handschrift / Essen mit Besteck eingeschränkt	2
Handschrift / Schnürsenkel binden ungeschickt	3
Normale Handschrift / Feinmotorik	4
Funktionen der Hinterstränge (Propriozeption und Koordination)	Punkte
An-/Auskleiden nur mit Hilfe	1
An-/Auskleiden ungeschickt und langsam	2
An-/Auskleiden normal	3
Hinterwurzeln (segmental radikuläre Paraesthesie / Schmerzen)	Punkte
Invalidisierende Schmerzen	1
Ertragbare Parästhesien/Schmerzen	2
Keine Parästhesien/Schmerzen	3
Summe	
Einteilung nach der Punktzahl (Summe)	
Punkte	EMS-Grad
5-8	Grad III
9-12	Grad II
13-16	Grad I
17-18	normal

Abb. 9: Der Europäische Myelopathie Score

Anhand des EMS-Wertes, präoperativ und zum finalen Follow-Up, wird die postoperative neurologische Erholung, die sogenannte “Recovery Rate” (RR), berechnet:

$$\text{Recovery Rate} = \frac{\text{präoperativer Wert} - \text{postoperativer Wert}}{\text{Gesamtpunktzahl (18)} - \text{präoperativer Wert}} \times 100$$

Abb. 10: Formel zur Berechnung der Recovery Rate

4.3.2. Neck-Disability-Index (NDI)

Der NDI erfasst HWS-Beschwerden bei alltäglichen Aktivitäten und besteht aus 10 Items mit 6 Antworten.

1. Schmerzintensität
2. Körperliche Fürsorge (Waschen, Ankleiden, usw.)
3. Heben
4. Lesen
5. Kopfschmerzen
6. Konzentration
7. Arbeit
8. Auto fahren
9. Schlaf
10. Freizeitaktivitäten / Erholung

Der NDI wurde im Jahre 1989 von Howard Vernon am kanadischen Memorial Chiropractic College in Toronto als Modifikation des Oswestry Low Back Pain Disability Index entwickelt und beinhaltet die folgenden 10 Kategorien: Schmerzintensität, körperliche Fürsorge, Heben, Lesen, Kopfschmerzen, Konzentration, Arbeit, Autofahren sowie Freizeitaktivitäten (Vernon et al., 1991). Für jede Kategorie existieren fünf abgestufte Antworten, denen zwischen fünf und null Punkte zugeordnet sind. Die größte Einschränkung

korreliert mit dem Punktwert von 5 und keine Einschränkung entspricht 0 Punkten. Die maximale Punktzahl beträgt bei zehn Fragen 50 Punkte. Um den NDI zu errechnen, wird die am Ende erreichte Punktzahl durch 50 geteilt und mit 100 multipliziert.

$$\frac{\text{Gesamtpunktzahl}}{50} \times 100 = \text{NDI}$$

Abb. 11: Berechnung des Neck-Disability-Index (NDI)

Der Neck-Disability-Index wurde in der vorliegenden Studie für jeden Patienten präoperativ und anlässlich jeder Follow-Up Untersuchung erhoben.

4.3.3. EQ-5D

Der EQ-5D ist ein validierter Gesundheitsfragebogen, anhand dessen der Patient seinen Zustand einordnen kann. Der EQ-5D besteht aus 5 Items mit jeweils 5 Antworten.

1. Beweglichkeit / Mobilität
2. Für sich selbst sorgen
3. Allgemeine Tätigkeiten
4. Schmerzen / körperliche Beschwerden
5. Angst / Niedergeschlagenheit

Aus den 5 Items wird ein Gesamtscore gebildet und präoperativ sowie zu jedem Follow-Up erhoben. Es können 3125 unterschiedliche Gesundheitszustände erfasst werden. Die 5-stellige Zahlenkombination (z.B. 12331) wird über einen speziellen Algorithmus in einen Punktwert umgewandelt, der den Gesundheitszustand des Patienten darstellt. Der Indexwert von 1 entspricht dem bestmöglichen Gesundheitszustand, während ein Wert unter 0 den schlechtmöglichsten repräsentiert.

Bitte kreuzen Sie unter jeder Überschrift DAS Kästchen an, das Ihre Gesundheit HEUTE am besten beschreibt.

BEWEGLICHKEIT / MOBILITÄT

- Ich habe keine Probleme herumzugehen
- Ich habe leichte Probleme herumzugehen
- Ich habe mäßige Probleme herumzugehen
- Ich habe große Probleme herumzugehen
- Ich bin nicht in der Lage herumzugehen

FÜR SICH SELBST SORGEN

- Ich habe keine Probleme, mich selbst zu waschen oder anzuziehen
- Ich habe leichte Probleme, mich selbst zu waschen oder anzuziehen
- Ich habe mäßige Probleme, mich selbst zu waschen oder anzuziehen
- Ich habe große Probleme, mich selbst zu waschen oder anzuziehen
- Ich bin nicht in der Lage, mich selbst zu waschen oder anzuziehen

ALLTÄGLICHE TÄTIGKEITEN (z. B. Arbeit, Studium, Hausarbeit, Familien- oder Freizeitaktivitäten)

- Ich habe keine Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- Ich habe leichte Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- Ich habe mäßige Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- Ich habe große Probleme, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen
- Ich bin nicht in der Lage, meinen alltäglichen Tätigkeiten nachzugehen

SCHMERZEN / KÖRPERLICHE BESCHWERDEN

- Ich habe keine Schmerzen oder Beschwerden
- Ich habe leichte Schmerzen oder Beschwerden
- Ich habe mäßige Schmerzen oder Beschwerden
- Ich habe starke Schmerzen oder Beschwerden
- Ich habe extreme Schmerzen oder Beschwerden

ANGST / NIEDERGESCHLAGENHEIT

- Ich bin nicht ängstlich oder niedergeschlagen
- Ich bin ein wenig ängstlich oder niedergeschlagen
- Ich bin mäßig ängstlich oder niedergeschlagen
- Ich bin sehr ängstlich oder niedergeschlagen
- Ich bin extrem ängstlich oder niedergeschlagen

Abb. 12: Fragebogen EQ-5D

4.3.4. Numerische Analogskala

Die numerische Analogskala ermöglicht es einem Patienten seinen Schmerz einzuordnen. Auf der Schmerzskala von 0 bis 10, bedeutet 0 “kein Schmerz” und 10 “stärkster Schmerz”.

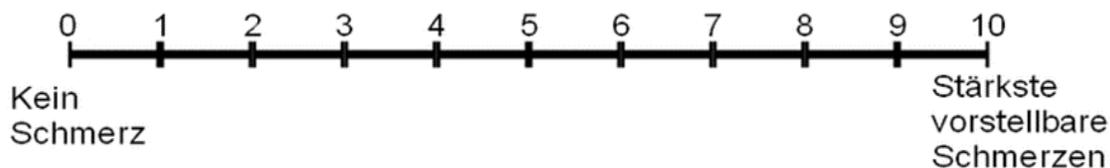


Abb. 13: Die numerische Analogskala

Die Skala dokumentierte in der vorliegenden Studie Nacken- und Armschmerz präoperativ und zum Follow-Up Zeitpunkt.

4.4. Komplikationserfassung

In der Klinik für Spinale Chirurgie werden peri- und postoperative Komplikationen in einem klinikeigenen Register erfasst. In einem digitalen Formblatt werden wirbelsäulenchirurgisch spezifische (z.B. Duraläsion), wirbelsäulenchirurgisch neurologische (z.B. C5 Parese) und allgemeine Komplikationen (z.B. dekompensierte Niereninsuffizienz) dokumentiert. Der Zeitpunkt der Komplikation wird als intra-, post-operativ stationär und poststationär definiert. Die Schwere der Komplikation wird als „adverse events“ (AE) in sechs Schweregrade eingeteilt (Rampersaud et al., 2016). Diese reichen von “keine Behandlung erforderlich” (AE 1) über “invasive Maßnahmen mit temporärem Effekt” (AE 2) bis zu “Patient verstirbt” (AE 6).

Die erfassten Komplikationen werden in regelmäßigen Abständen (Q-Time) zur klinikinternen Weiterbildung sowie zur Qualitätssicherung aufgearbeitet und mit den entsprechenden Komplikationsraten der aktuellen Literatur verglichen.

4.5. Präoperative Bildgebung

Eine aktuelle MRT, CT und Röntgenaufnahmen der HWS in 2 Ebenen mit In-/Reklinationsaufnahmen sind zur OP-Planung erforderlich.

4.6. Operative Techniken

Es werden vier OP-Techniken über ventralen, dorsalen oder kombinierten Zugang erläutert.

4.6.1. Ventrale Dekompressionsverfahren

Anteriore zervikale Diskektomie und Fusion (ACDF)

Die anteriore zervikale Diskektomie und Fusion ermöglicht die Dekompression des Spinalkanals und der Neuroforamina eines oder mehrerer zervikaler Segmente.

Über einen anterolateralen Zugang wird die Bandscheibe mikrochirurgisch entfernt, das Segment knöchern dekomprimiert und ein Cage (Platzhalter) in den Zwischenwirbelraum eingesetzt, um eine Fusion zu erzielen.

Der Patient wird in Rückenlage auf dem OP-Tisch gelagert und fixiert.

Das zu operierende Segment wird unter Röntgenkontrolle markiert. Es folgt das Anzeichnen der Mittellinie, des M. sternocleidomastoideus und der horizontalen Schnittführung, die in der Regel von links erfolgt. Rezidiveingriffe, vorbestehende Lähmungen des N. laryngeus recurrens und die extreme einseitige Einengung des Wurzelkanals erfordern gelegentlich ein Abweichen von der Regel.

Nach Inzision der Haut und des Subkutans folgt die stumpfe Präparation der Weichteile medial des M. sternocleidomastoideus. Mobilisation des Ösophagus und der Luftröhre nach kontralateral und der Halsgefäße nach ipsilateral. Einsetzen des Sperrers und Höhenkontrolle mittels Bildwandler. Einbringen des OP-Mikroskops. Eindrehen von Distractionsschrauben in die benachbarten Wirbelkörper zu deren Distraction. Einschneiden des Faserrings und Ausräumen des Bandscheibenfaches. Resektion des hinteren Längsbandes und sämtlicher

dorsaler Spondylophyten, um die Neurostrukturen vollständig zu dekomprimieren. Einbringen eines Probecages unter Bildwandlerkontrolle und Auswahl des entsprechenden permanenten Implantates. In der Vergangenheit wurden PEEK-Ringe (Neocif, Biomet, Berlin) mit autologen Knochenchips gefüllt. Aktuell verwenden wir 3D-gedruckte Titanimplantate (Oyster, Silony, Bremen). Die Überdistraktion von benachbarten Wirbelkörpern durch einen zu hohen Cage ist zu vermeiden, um das Auftreten von postoperativen, interskapulären Schmerzen zu reduzieren. Kontrolle der Implantatlage unter Durchleuchtung in beiden Ebenen, Entfernen des Sperrers und schichtweiser Wundverschluss.

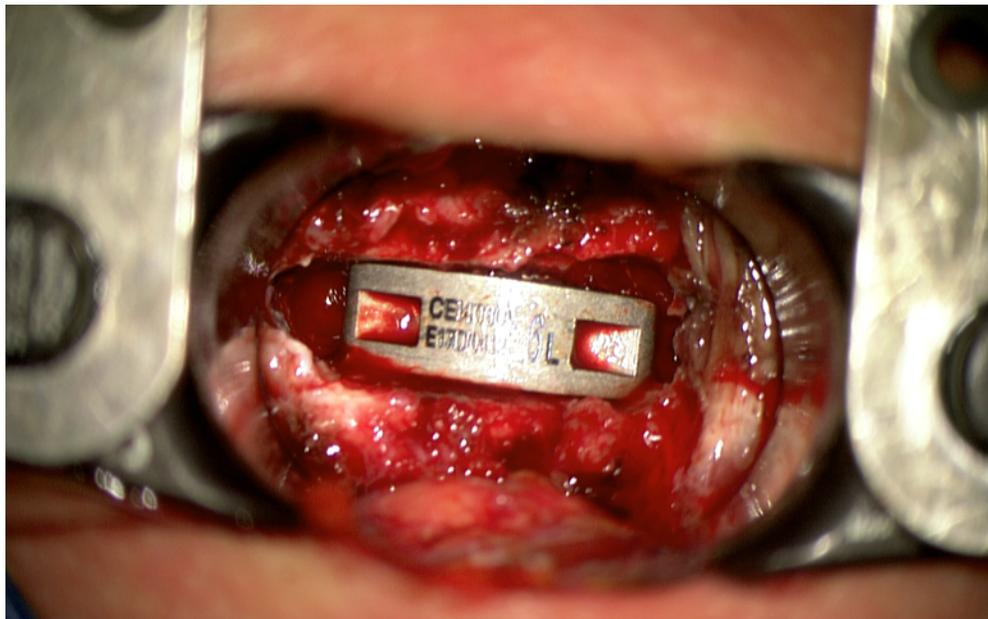


Abb. 14: ACDF: Titan-Cage in situ (Papavero, 2020)



Abb. 15: Z.n. ACDF C6/C7 mit röntgentransparentem PEEK-Cage (Neocif, Biomet, Berlin). Drei kleine Bariumstifte ermöglichen die räumliche Zuordnung des Implantates.

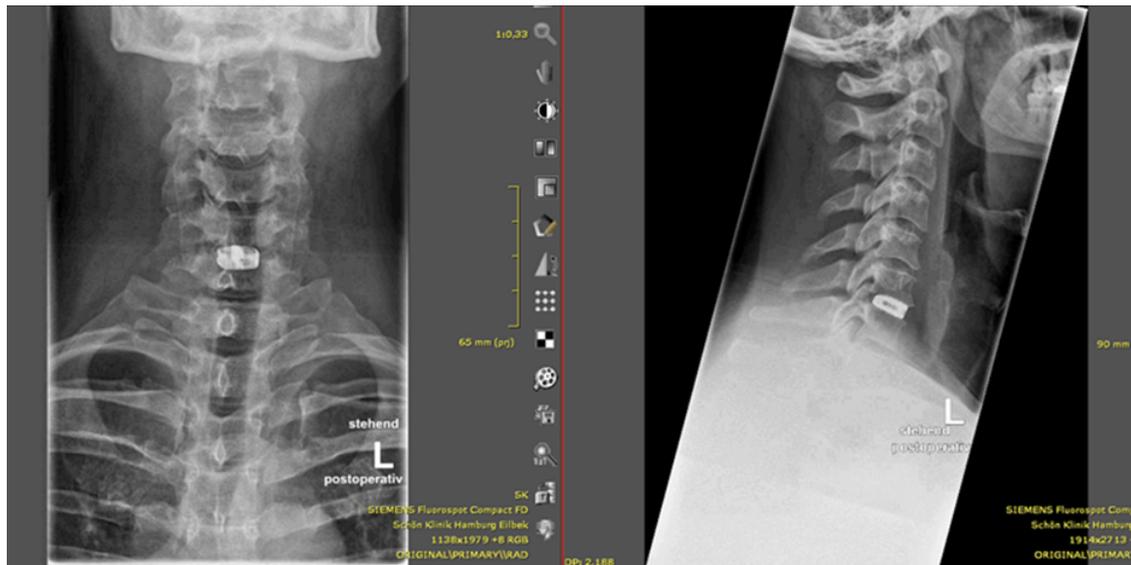


Abb. 16: Z.n. ACDF C6/C7 mit röntgendichtem, 3-D Druck, Titancage (Oyster, Silony, Bremen). In der a.p.-Aufnahme ist der Cage zwar zentriert, aber deutlich nach links (Zugangsseite) gedreht.

Anteriore zervikale Korporektomie und Fusion (ACCF)

Die monosegmentale anteriore zervikale Korporektomie und Fusion dekomprimiert das Myelon von raumfordernden Spondylophyten oder durch ein OPLL, die dorsal des Wirbelkörpers das Rückenmark bedrängen.

Über einen Zugang wie bei ACDF, jedoch etwas erweitert, werden ein oder mehrere Wirbelkörper und die benachbarten Bandscheiben entfernt, die Neurostrukturen dekomprimiert und ein distrahierbares Titanimplantat (z.B. MediExpand, Medicon e.G., Tuttlingen) eingesetzt, um eine Fusion zu erzielen.

Der Patient wird in Rückenlage auf dem OP-Tisch gelagert und fixiert.

Unter Durchleuchtung Markieren der Wirbelkörpermitte und Anzeichnen der Mittellinie, des M. Sternocleidomastoideus und der horizontalen Schnittführung.

Hautinzision, Spalten des Platysmas und stumpfe Präparation der Weichteile in der Loge medial des M. sternocleidomastoideus auf das Bandscheibenfach kranial und kaudal des zu resezierenden Wirbelkörpers. Ablösen des M. longus colli beidseits und Einsetzen eines Retraktors. Einbringen zweier Distractionspins in den kranial und kaudal angrenzenden Wirbelkörpern. Ausräumen der Bandscheibenfächer, die dem Wirbelkörper angrenzen, der entfernt werden soll. Beidseitige Markierung der lateralen Korporektomiegrenze mit der Fräse und Entfernung des zentralen Anteiles des Wirbelkörpers bis auf die hintere Kortikalis. Unter Mikroskop Ausdünnen der hinteren Kortikalis bis auf das hintere Längsband und Resektion desselben zur vollständigen Dekompression des Duralsackes. Uncoforaminotomie in Höhe des kranialen Bandscheibenfaches mit Undercutting der Wirbelkörperhinterkante. Gleiches Vorgehen im kaudal angrenzenden Segment. Unter seitlicher Bildwandlerkontrolle erfolgt das Austasten der Resektionsränder und der Neuroforamina zur Überprüfung der Dekompression. Das Ausmessen der Defektgröße führt zur Auswahl der Größe des distrahierbaren Wirbelkörperersatzes sowie dessen Einbringen unter Bildwandlerkontrolle und Distraction in situ. Der Wirbelkörperersatz wird nach angemessener Distraction mit dem Drehmomentschlüssel verriegelt. Das Implantat wird mit kortikospongiösen Chips befüllt.

Einbringen zweier Fixationsschrauben in den kranial und kaudal angrenzenden Wirbelkörper. Entfernen des Retraktors und schichtweiser Wundverschluss (Abb. 17).

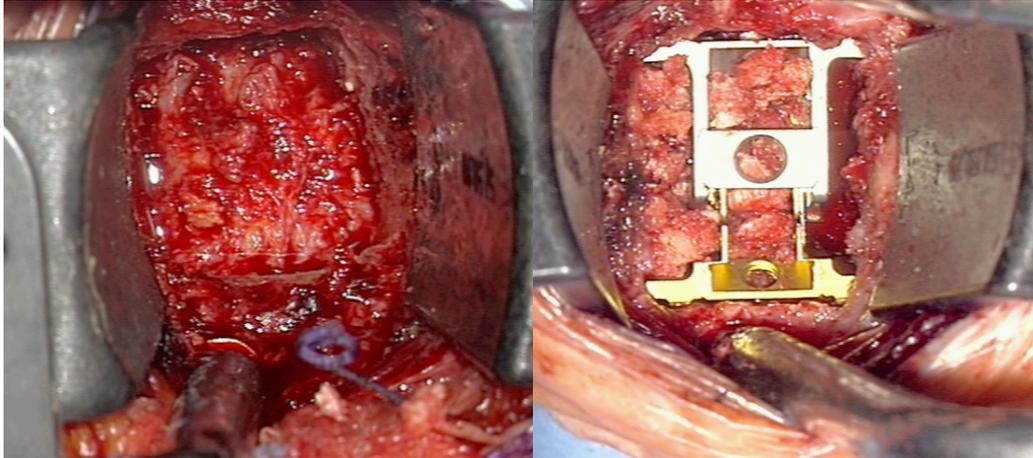


Abb. 17: (links) Z.n. Resektion des Wirbelkörpers. Das hintere Längsband ist noch in situ. (rechts) Das distrahierbare Implantat ist eingesetzt, aber noch nicht mit den Ankerschrauben fixiert. Das Implantat und eine Seite des Epiduralraumes sind mit Knochenchips gefüllt. Die andere Seite ermöglicht den Abfluss von Blut. (Papavero, 2020)

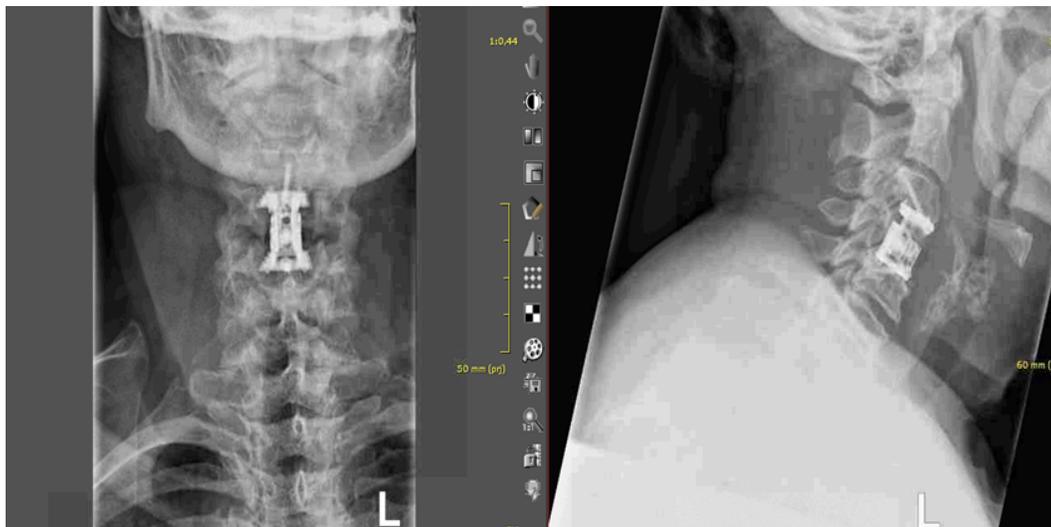


Abb. 18: ACCF HWK4

4.6.2. Dorsalen Dekompressionsverfahren

Laminektomie mit bilateraler Fusion

Anlage der Mayfield-Klemme in Rückenlage. Umlagerung des Patienten in Bauchlage und Fixation der Klemme. Einstellung der sogenannten "Concorde"-Position (Abb. 19) und Lagerung des Kopfes in Anteflexion. Markieren der Dornfortsätze von HWK2 und HWK6 unter Durchleuchtung zum Festlegen der Länge des Hautschnittes. Hautinzision auf der Mittellinie und mediane subkutane Präparation auf die Muskelfaszie, welche inzidiert wird. Beidseitiges subperiostales Ablösen der Muskulatur zur Darstellung der Laminae C3-7. Einsetzen des Sperrers (CCR, Aesculap, Tuttlingen). Die Gelenke C3/4, C4/C5 und C5/6 werden eröffnet. Unter Bildwandlerkontrolle werden die polyaxialen Schrauben in die Massae laterales C3-6 beidseits eingebracht. Fräsen zweier Rillen in die Bögen C3-6 beidseits und Nacharbeiten mit einer 2mm Stanze, so dass die Bögen C3, C4, C5 und C6 entfernt werden können. Unter Mikroskop Vervollständigung der Dekompression durch Flavektomie und Undercutting des kranialen Anteiles des Wirbelbogens C7. Anlage von autologem Knochen auf die eröffneten Gelenke zur Fusion. Lordosierung der Kopfposition in der Mayfield-Klemme und Einbringen zweier vorgebogener Längsstäbe und Fixierung mit Innies, die unter diskreter Kompression verriegelt werden (Abb. 20). Schichtweiser Wundverschluss und atraumatische Hautnaht. Nach Umlagerung des Patienten in Rückenlage Entfernen der Mayfield-Klemme.

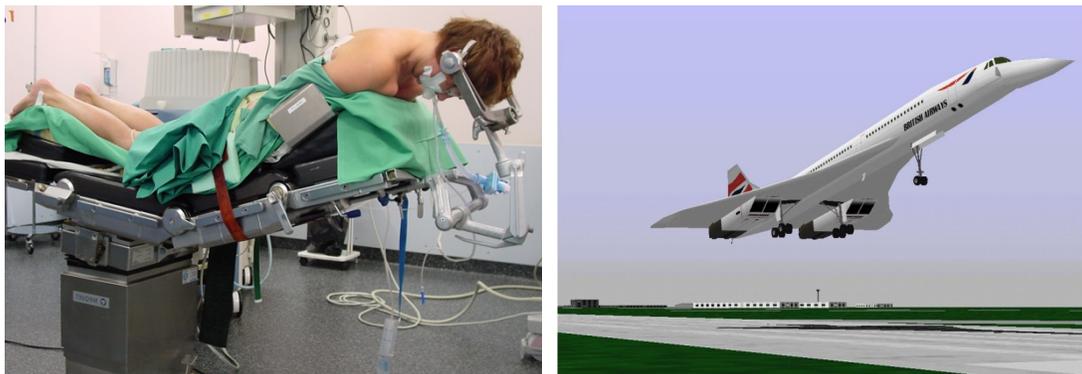


Abb. 19: "Concorde" Lagerung

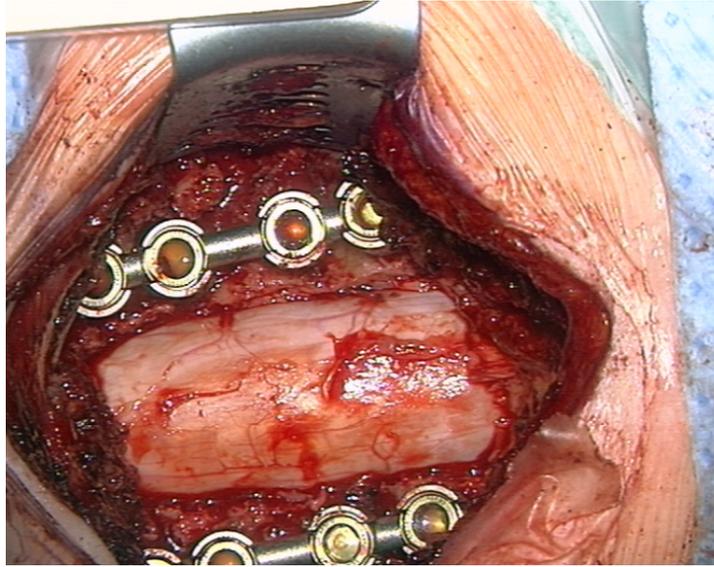


Abb. 20: Laminektomie C3-6 mit bilateraler Fusion (Papavero, 2020)

Open-Door Laminoplastie

Die Open-Door Laminoplastie über einseitigen Zugang beinhaltet das einseitige Durchfräsen der Wirbelkörperbögen und ihre kontrollierte Anhebung nach kontralateral bis eine Grünholz-Fraktur am Übergang zwischen dem kontralateralen Bogen und dem Gelenkkomplex (lamino-facet junction) entsteht. Diese macht sich mit einem Spannungsverlust beim Anheben des Bogens bemerkbar. Es folgt die Fixierung der „aufgeklappten“ Bögen, üblicherweise C3-C6, mit Titanplättchen und Minischrauben (Abb. 21, 22).

In Rückenlage Anlage der Mayfield-Klemme und Umlagerung des Patienten in Bauchlage. Fixation der Klemme und Einstellung der Concorde-Position mit Anteflexion des Kopfes. Markierung der Dornfortsätze C2 und C6 zum Festlegen der Länge des Hautschnitts. Medianer Hautschnitt und streng mediane subkutane Präparation auf die Muskelfaszie, welche auf der Zugangsseite etwas paramedian von C2–C6 inzidiert wird. Einseitiges subperiostales Ablösen der Muskulatur und Darstellung der Hemilaminae C3-C6. Einsetzen

des Sperrers (CCR-Sperrer, Aesculap, Tuttlingen). Laminotomie von C6 nach C3 mittels einer Diamantfräse. Inzision der inter- und supraspinalen Bänder in Höhe C2/3 und C6/7. Anheben jeder einzelnen Hemilamina von C3 bis C6 bis zum Spannungsverlust infolge der kontralateralen Günholzfraktur. Das Aufklappen der Bögen erweitert den Querschnitt des Spinalkanals und das Myelon „shifted“ nach dorsal. Unter Mikroskop Undercutting des kranialen Anteiles des Bogens C7 sowie Resektion des Lig. Flavum. Fixation der Osteotomie mittels vorgebogener Miniplättchen (SecureSpan, Aesculap, Tuttlingen), die in der Gelenkfacette und am korrespondierenden Wirbelbogen C3-C6 durch Minischrauben fixiert werden. Schichtweiser Wundverschluss sowie Umlagerung des Patienten in Rückenlage und Abnahme der Mayfield-Klemme.



Abb. 21: Laminoplastie C3-6 über einseitigen Zugang links. Die linksseitige Bildhälfte ist kranial. (Papavero, 2020)



Abb. 22: (links und Mitte) Z.n. Laminoplastie C3/C6 über einseitigen Zugang links. (rechts) In der axialen CT-Schicht ist die Grünholzfraktur kontralateral zur „opening side“ gut zu erkennen. Interessanterweise hat eine postoperative CT-Serienuntersuchung gezeigt, dass sich der Frakturbereich nicht in den Spinalkanal wölbt. (Operative Orthopädie und Traumatologie, Kothe 2018)

Laminoplastie und unilaterale Fusion

Die Laminoplastie wird durch ein einseitiges Schrauben-Stab-System zur Stabilisierung ergänzt. Diese Maßnahme soll der postoperativen Kyphosierung der HWS vorbeugen. Sie ist besonders indiziert, wenn klinisch ausgeprägte Nackenschmerzen bestehen und die Bildgebung eine präoperativ nur grenzwertig lordotische HWS nachweist.

Zugang analog zur Laminoplastie. Einseitiges subperiostales Ablösen der Muskulatur in Knopflochtechnik zur Darstellung der Hemilaminae C3-6 (Abb. 23). Eröffnen der Gelenke C3-C6. Einsetzen des Sperrers (CCR-Sperrer, Aesculap, Tuttlingen). Vorbohren der Schraubenlöcher in die Massae laterales C3-6 unter Bildwandlerkontrolle und Versiegeln mit Knochenwachs. Laminotomie von C6 nach C3 mit dem Kraniotom (Abb. 24) Dekompression mittels „Aufklappen“ der Halbbögen wie für die Laminoplastie beschrieben. Vorbiegen der Miniplatten (SecureSpan, Aesculap, Tuttlingen) und Fixierung derselben in der Gelenkfacette mit einer Polyaxialschraube und am Dornfortsatz mit einer Minischraube in Höhe C3, C4, C5 und C6 zur Stabilisierung der Osteotomie (Abb. 25). Neujustierung der Mayfield-Klemme zum Einstellen einer guten Lordose und Einsetzen des Längsstabes.

Fixierung mit Innies und Anlage von autologem Knochen auf die eröffneten Gelenke C3-6 zur Fusion. Schichtweiser Wundverschluss und Umlagerung des Patienten in Rückenlage. Abnahme der Mayfield-Klemme.



Abb. 23: (links) "konventioneller" bilateraler Zugang und (rechts) unilateraler Zugang



Abb. 24: (links) Vorbohren der Löcher für die polyaxialen Massae laterales Schrauben und (rechts) Laminotomie C3-C6

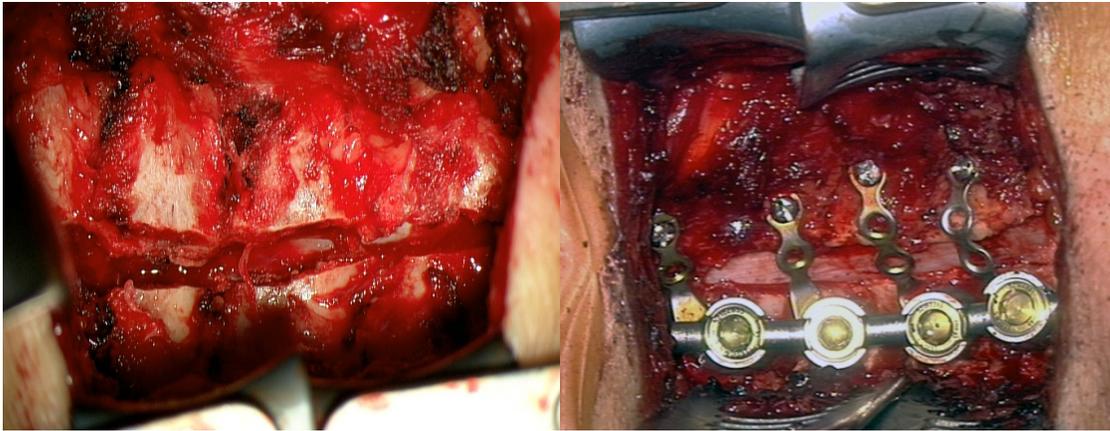


Abb. 25: (links) Aufbrechen der Bögen; (rechts) Fixierung und Fusion unilateral (Schmeiser, 2019)

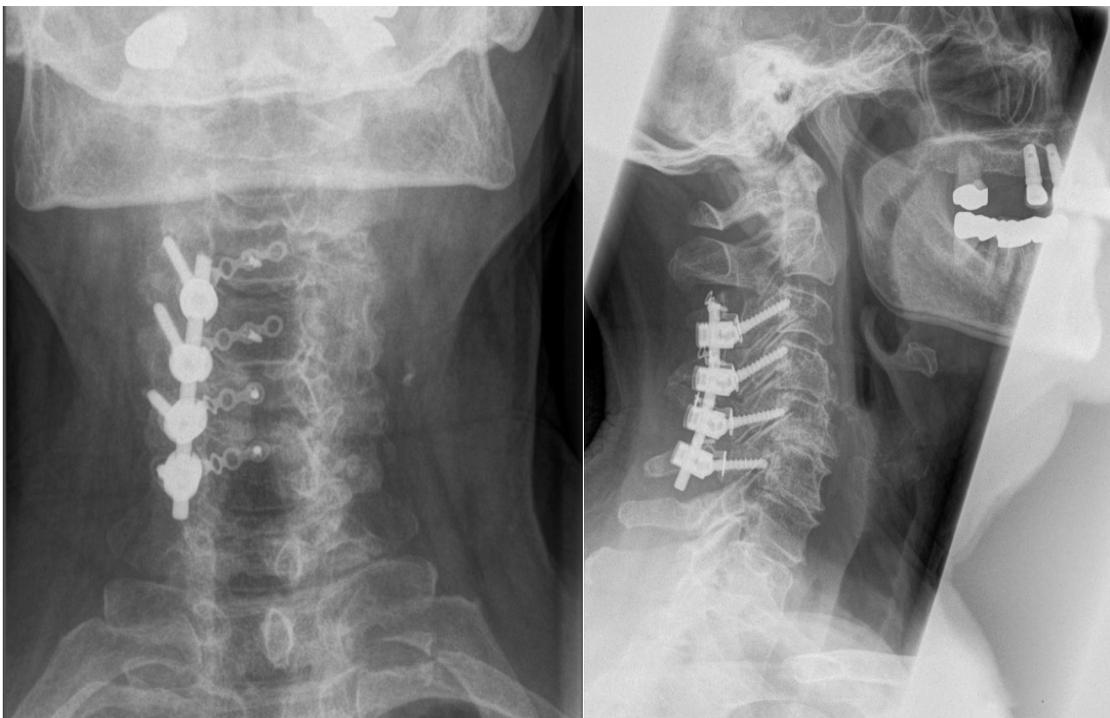


Abb. 26: Z.n. Laminoplastie mit unilateraler Instrumentation über einseitigen Zugang. Bemerkenswert ist die erhaltene Lordose (Schmeiser, 2019)

4.7. Postoperative Nachbehandlung

Die Patienten wurden postoperativ mindestens zwei Stunden im Aufwachraum auf Vitalparameter, Schmerzniveau und neurologischen Status überwacht. Bei stabilen Verhältnissen wurden sie auf Normalstation verlegt und frühzeitig mobilisiert. Der Kostaufbau erfolgte ebenfalls zeitnah.

Eine postoperative Halskrawatte war nach keiner der vier Operationstechniken erforderlich.

Während der 3-wöchigen poststationären physiotherapeutischen Behandlung wurden ausgeprägte Rotationsbewegungen vermieden.

Die ambulanten klinischen und radiologischen Nachuntersuchungen erfolgten 12 Wochen sowie mindestens 1 Jahr postoperativ.

4.8. FXA-Auswertung der Röntgenaufnahmen

Die radiologische Auswertung erfolgte bei 92 Patienten mit der "Functional X-Ray Analysis" (FXA, Raylytic GmbH, Leipzig). Das medizinische Softwarepaket dient der Analyse und Quantifizierung von Röntgenaufnahmen mit höchster Genauigkeit und Reliabilität. Es ist von der FDA anerkannt und zugelassen.

FXA arbeitet mit einer Bildanalyse: definierte Strukturen (z.B. Wirbelkörperendplatte) werden identifiziert, identische Strukturen registriert und Positionsveränderungen zwischen den Bildern berechnet. Als Basis dient der gesamte Bildinhalt in Verbindung mit modernen Methoden der Bildanalyse. Die Vollautomatisierung des Prozesses der "Datenextraktion" aus medizinischen Bildern zur nachfolgenden Datenanalyse ermöglicht eine sehr hohe Präzision. Auf diese Weise können über 80 Parameter (z.B. der Fusionsstatus, die Implantatlage oder auch spezielle Winkel und Deformitäten an der Wirbelsäule) ausgewertet werden. In dieser Studie wurden folgende Parameter bei den prä- und postoperativen Röntgenaufnahmen gemessen und statistisch ausgewertet:

ROM C3-6, C2-7 COBB Angle, C2-7 hintere Tangente Methode, Lordose C0-C2, C1/2 Winkel, C1-7 Sagittale Vertikale Achse (SVA), C2-7 SVA sowie C7 Slope.

Nachfolgend eine Erläuterung der verwendeten Parameter:

Die **Range of Motion (ROM)** beschreibt den Bewegungsumfang (Angabe in Winkelgraden) zwischen zwei Wirbelkörpern während der In-/ Reklination. In der vorliegenden Studie erfolgte die Bestimmung zwischen dem oberen (= Index 1) und unteren "Index-Segment" (= Index 3).

Die **Range of Motion C3-6 (ROM C3-6)** beschreibt den Bewegungsumfang (Angabe in Winkelgraden) zwischen dem 3. und 6. Halswirbelkörper (Abb. 27).

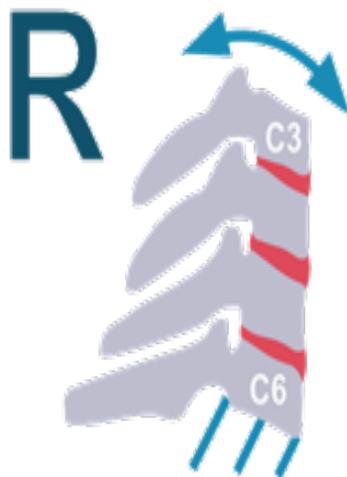


Abb. 27: Range of Motion (ROM) C3-6

Der **C2-C7 COBB Angle** ist der Winkel (Angabe in Winkelgraden) zwischen der kaudalen Endplatte von C2 und der kaudalen Endplatte von C7 (Abb. 28).

Die **C2-7 hintere Tangente Methode** beschreibt den Winkel (Angabe in Winkelgraden) zwischen den Tangenten an der Wirbelkörperhinterkanten C2 und C7 (Abb. 29).

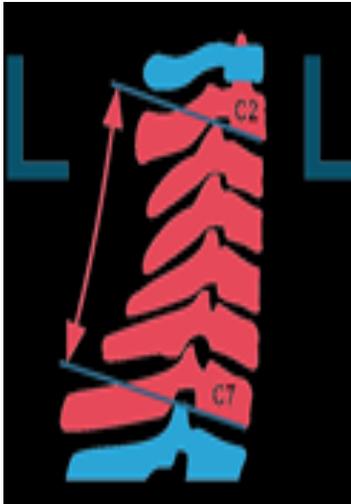


Abb. 28: C2-7 COBB Angle

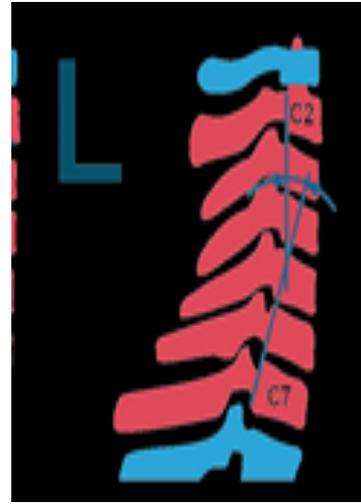


Abb. 29: C2-7 hintere Tangente Methode

Die **sagittale vertikale Achse (SVA) C2-7** beschreibt die horizontale Distanz zwischen dem Zentrum von C2 und der kranialen Ecke der Hinterkante von C7 (Abb. 30).



Abb. 30: C2-7 SVA

Der **zervikale Lordosewinkel C0 / C2** (Angabe in Winkelgraden) beschreibt den Winkel zwischen der McGregor Linie und der Grundplatte von C2 (Abb. 31).

Der **zervikale Lordosewinkel C1 / C2** beschreibt den Winkel (Angabe in Winkelgraden) zwischen der Verbindungslinie des vorderen Tuberkels mit der Hinterkante und der Grundplatte von C2 (Abb. 32).

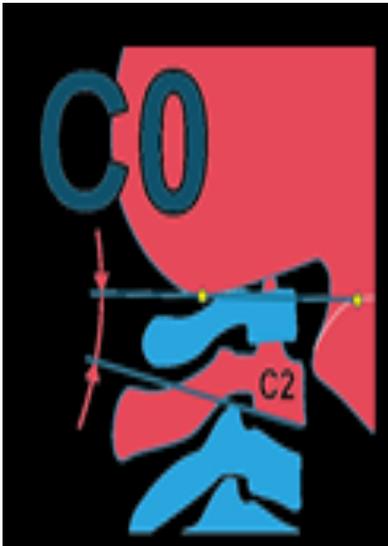


Abb. 31: Lordose C0-C2

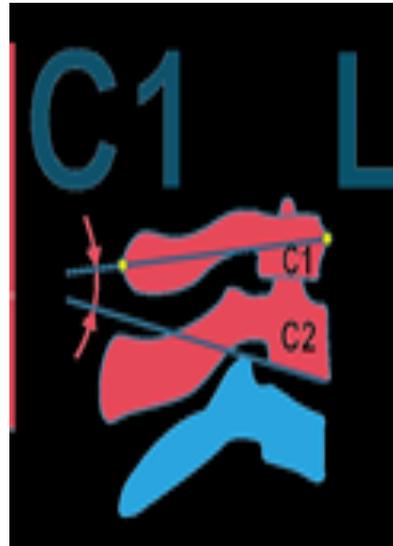


Abb. 32: C1/2 Winkel

Der **C7 Slope** beschreibt den Winkel (Angabe in Winkelgraden) zwischen der horizontalen Linie und der Deckplatte von C7 (Abb. 33).

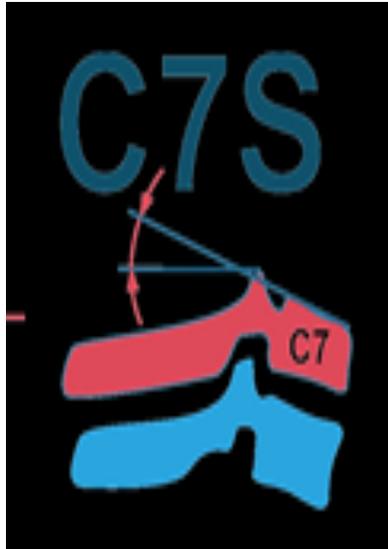


Abb. 33: C7 Slope

Für die prä- und postoperative Auswertung der MRT-Bilder wurde durch zwei unabhängige Untersucher der sagittale Durchmesser des Spinalkanals auf Höhe der Bandscheibenfächer C3/4, C4/5, C5/6 und C6/7 auf T2 gewichteten Mittellinienbildern gemessen. Die statistische Auswertung erfolgte durch Herrn Dr. Holger Aust (Databraineo, Bonn).

5. Ergebnisse

5.1. Klinische Auswertung

Das **Durchschnittsalter** der Patienten war 67 Jahre (Range 49 – 87 Jahre). Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Gruppen hinsichtlich Alter, Geschlecht und Vorerkrankungen.

Der **stationäre Aufenthalt** reichte von 6 bis zu 21 Tagen. Mit einer durchschnittlichen stationären Verweildauer (LOS, length of stay) von 8 Tagen zeigten die Gruppen LPL und LPUNIL einen kürzeren stationären Aufenthalt als die anderen Gruppen mit 10 (360°) bzw. 11,5 Tagen (LX). Die gesamte durchschnittliche stationäre Verweildauer betrug 9,6 Tage (Range 6 – 22 Tage).

Die längste **durchschnittliche OP-Zeit** war erwartungsgemäß bei der 360° Gruppe (Median 188 min.), die kürzeste bei der LPUNIL Gruppe (Median 95 min.). In dieser Gruppe zeigte sich jedoch auch die größte Streuung (Range 72 – 224 min.).

Die **Verteilung der ASA-Klassen** im Patientenkollektiv war: ASA 1 (2,4%), ASA 2 (53,6%), ASA 3 (39,2%) und ASA 4 (0%).

Die Daten werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Klinische Daten des Patientenkollektivs

		LX	360°	LPL	LPUNIL
N		24	20	20	20
Alter	Mean	67.7	65.6	69.8	66.9
	SD	9.2	8.6	9.4	8.7
	Median	68.5	65.5	71.5	67.0
	Range	49 – 80	49 – 79	50 – 87	51 - 81
sex	Female	33%	50%	25%	60%
LOS	Mean	11.5	11.3	9.5	8.8
	SD	3.6	3.2	3.8	2.2
	Median	11.5	10.0	8.0	8.0
	Range	6 - 18	7 – 20	6 – 21	6 - 14
ASA	ASA 1	0	0	0	2
	ASA 2	14	9	15	7
	ASA 3	10	10	5	8
OP-Zeit (in min)	Mean	137	203	118	119
	SD	37	51	33	49
	Median	134	188	125	95
	Range	76 – 210	143 – 357	61 – 168	72 - 224

Der präoperative **EMS** der vier Gruppen war homogen und lag im Median bei 13 Punkten (Range von 8 bis 17 Punkte). Postoperativ zeigten alle vier Gruppen einen verbesserten EMS, wobei die 360° Gruppe am besten abschnitt. Am wenigsten profitierte die LPL Gruppe, allerdings waren ihre präoperativen EMS-Werte vergleichsweise hoch. Insgesamt konnte in jeder Gruppe eine signifikante Verbesserung von 1 (LPL) bis zu 3,5 (360°) EMS-Punkten erreicht werden ($p < 0.001$), die auch eine klinische Relevanz hatte.

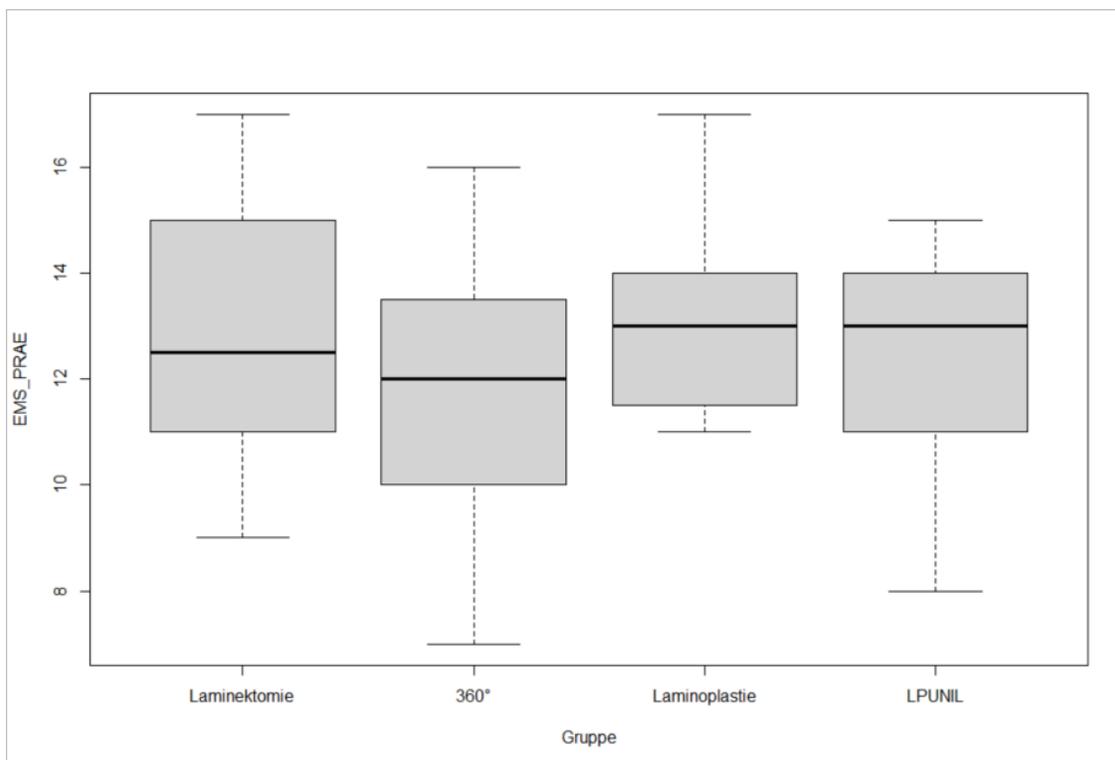


Abb. 34: Boxplots der präoperativen EMS-Werte der 4 Gruppen

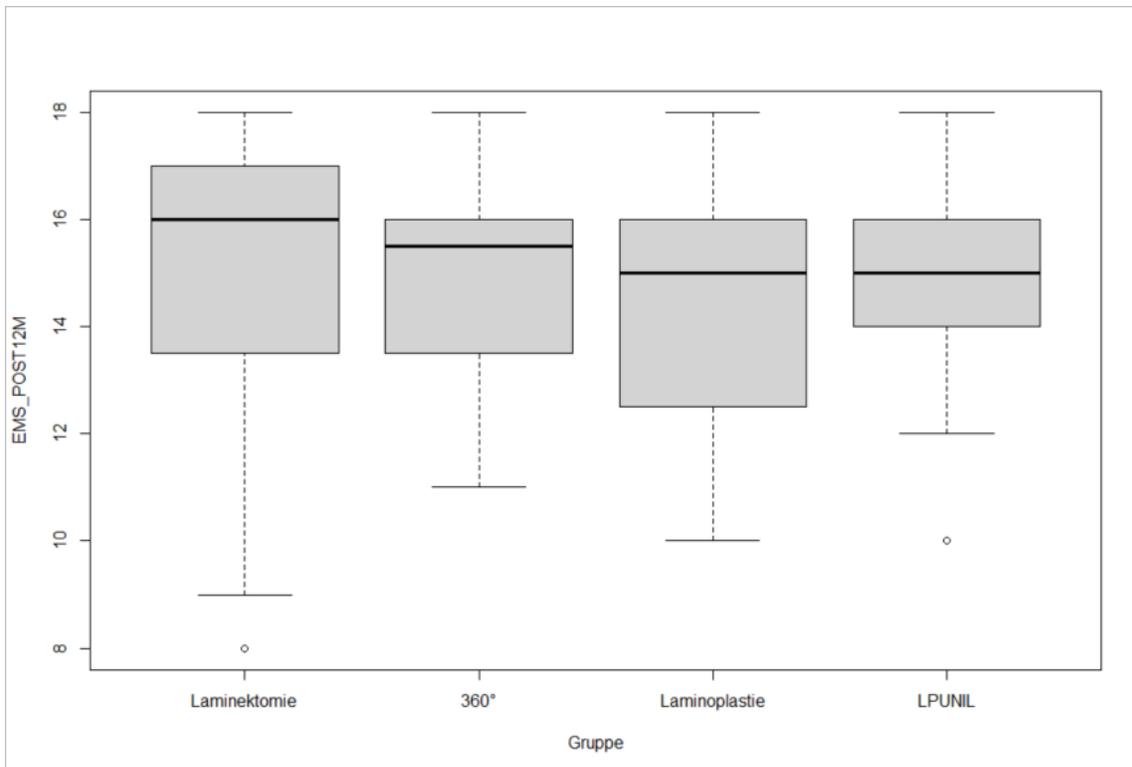


Abb. 35: Boxplots der postoperativen EMS-Werte der 4 Gruppen

Anhand der prä- und postoperativen EMS Werte wurde die **RR** berechnet. Die Auswertung der RR bestätigte die Verbesserung des präoperativen EMS Wertes in allen Gruppen. In der LPUNIL Gruppe belegte der Median von 46,4% und in der 360° Gruppe von 55% die gute postoperative neurologische Erholung der Patienten. Der Median von 29,2% in der LPL Gruppe, bzw. von 30,1% in der LX Gruppe fiel deutlich geringer aus. Aufgrund der Streuung in den Boxplots und infolge des Nachweises von drei Ausreißern erfolgte zur genaueren Betrachtung eine bereinigte Analyse ohne Ausreißer (vgl. Tab. 3 und Tab. 4, Abb. 36, 37).

Tabelle 3: Recovery Rate

		LX	360°	LPL	LPUNIL
N		24	20	20	20
RR	Mean	33.5	42.4	29.5	43.5
	SD	52.2	62.2	43.3	28.7
	Median	30.1	55.0	29.2	46.4
	Range	-150 – 100	-200 – 100	-100 – 100	0 - 100

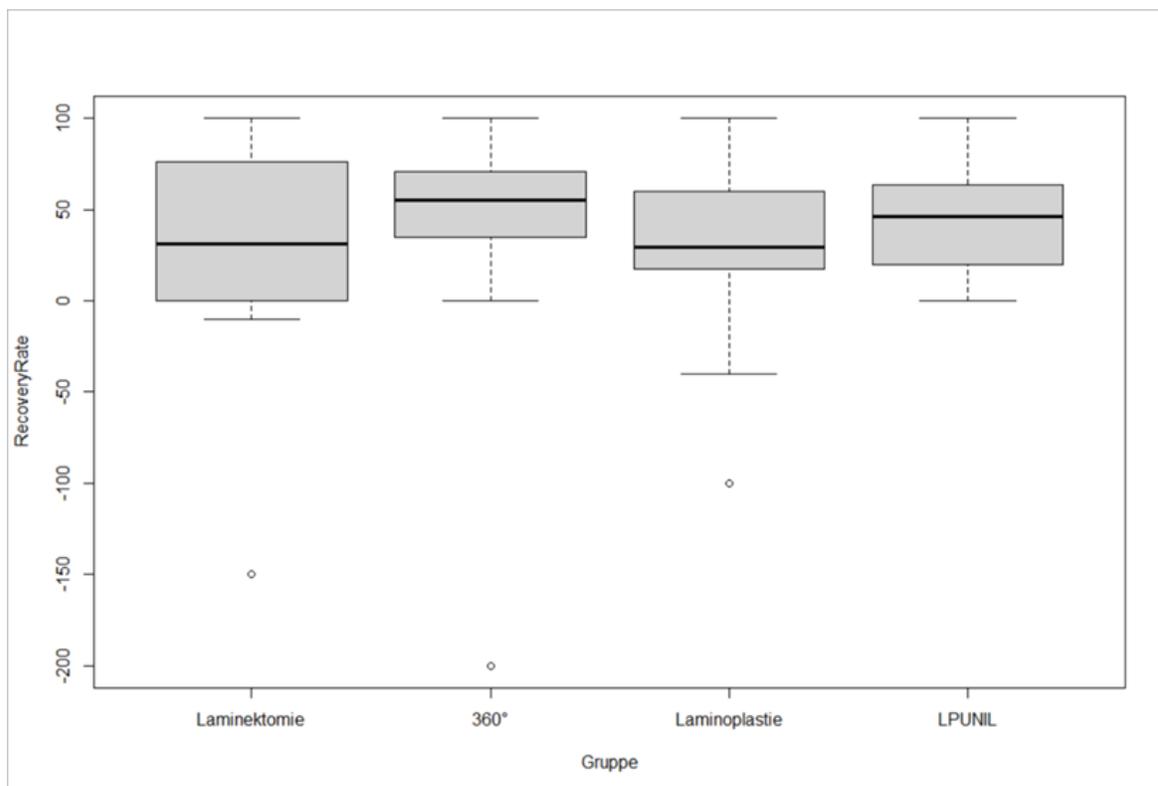


Abb. 36: Boxplot Recovery Rate (inkl. 3 Ausreißer)

Tabelle 4: Bereinigte Recovery Rate ohne Ausreißer

		LX	360°	LPL	LPUNIL
N		23	19	19	20
RR	Mean	41.5	55.2	36.4	43.5
	SD	35.4	25.5	31.6	28.7
	Median	33.3	60.0	33.3	46.4
	Range	-10 – 100	0 – 100	0-40 – 100	0 - 100

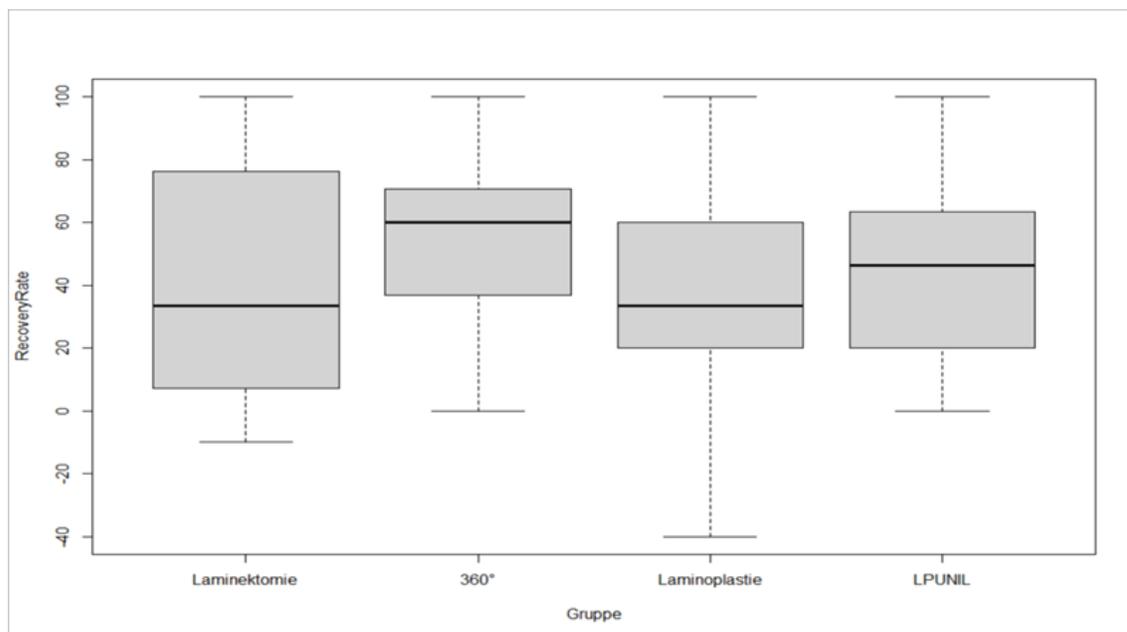


Abb. 37: Boxplot „bereinigte“ Recovery Rate ohne Ausreißer

In der um Ausreißer „bereinigten“ Analyse zeigte die 360° Methode eine deutlich bessere Recovery Rate als die anderen 3 Methoden. Die LPL fiel durch eine höhere Streuung auf, so

dass sie auch am stärksten in den negativen Bereich ragte. Im Median erreichten alle 4 OP-Techniken eine RR von über 20%.

Der NAS Arm zeigte präoperativ deutliche Unterschiede, die auch postoperativ weiter bestanden (Range 0-8). Die LPL Gruppe zeigte prä- und postoperativ die höchsten Werte. Die Armschmerzen waren bei allen OP-Techniken postoperativ reduziert und im Mittel nicht höher als 3,1 NAS (Tab. 5 und Abb. 38, 39).

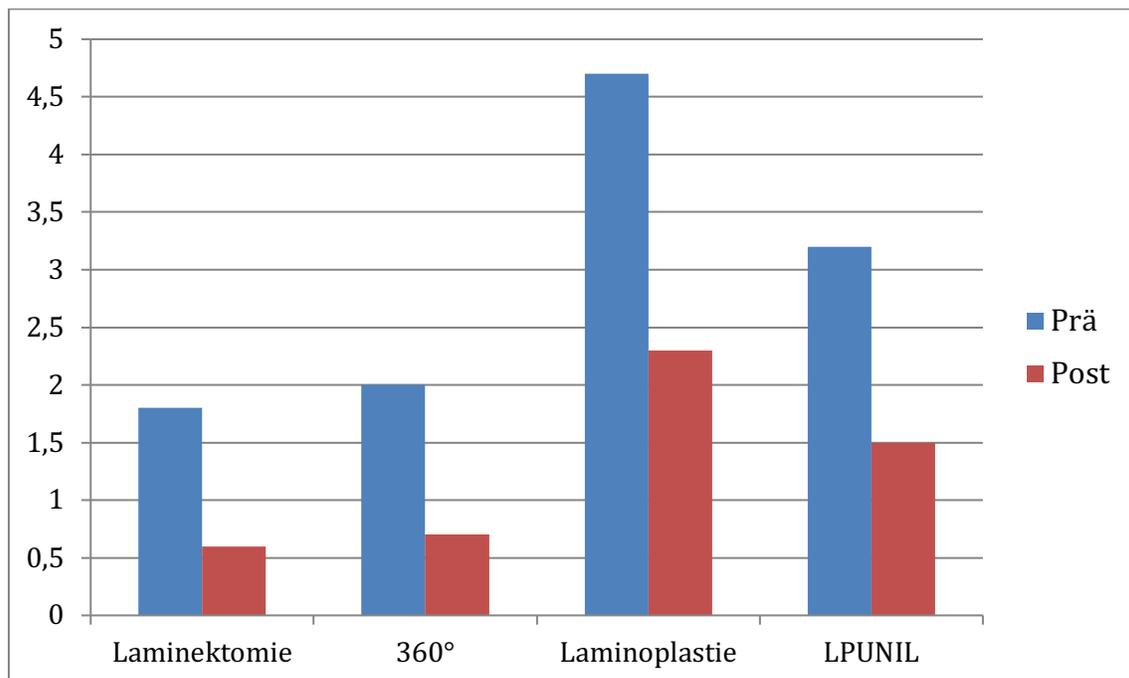


Abb. 38: NAS Arm Mittelwerte prä-/ postoperativ im Vergleich

Tabelle 5: NAS Statistik

		LX	360°	LPL	LPUNIL
N		24	20	20	20
NAS Arm prä	Mean	1.8	2.7	3.8	2.9
	SD	2.5	3.2	3.9	3.3
	Median	0.0	2.0	3.5	1.0
	Range	0 – 9	0 – 10	0 – 10	0 – 8
NAS Arm post	Mean	0.9	0.8	1.9	0.9
	SD	1.7	1.2	3.1	2.5
	Median	0	0	0	0
	Range	0 – 6	0 – 3	0 – 8	0 – 8
Delta prä / post	Mean	-0.8	-1.9	-2.0	-2.0
	SD	2.8	3.0	3.4	2.8
	Median	0	-1	0	0
	Range	-9 – 6	-9 – 3	-10 – 1	-8 – 0

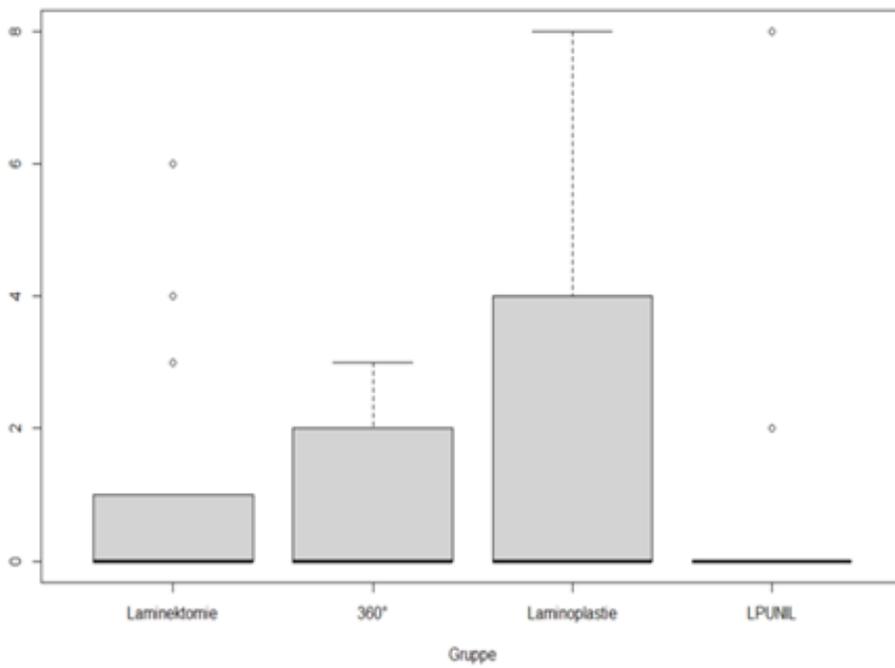
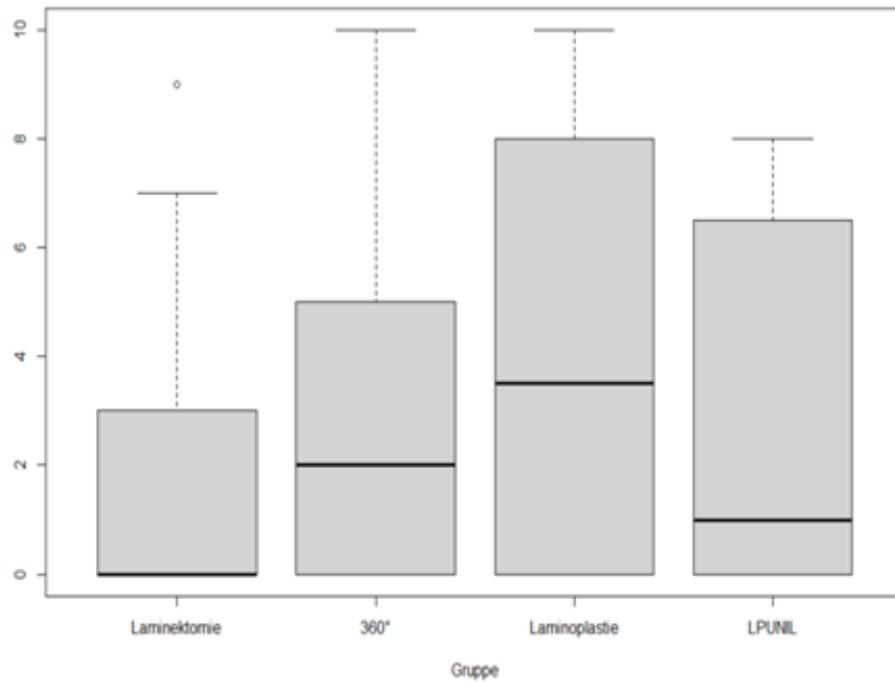


Abb. 39: Vergleich zwischen der prä- und 12-Monate postop. NAS Arm Werte

Die Auswertung der prä- und postoperativen Werte der NAS Neck ergab, trotz einiger Unterschiede, einen im Mittel vergleichbaren Wert (Tab. 6 und Abb. 40).

Tabelle 6: NAS Neck

		LX	360°	LPL	LPUNIL
N		24	20	20	20
NAS Neck prä	Mean	3.3	3.0	3.5	2.5
	SD	3.0	3.2	3.3	2.8
	Median	2.5	2.0	3.0	2.0
	Range	0 -9	0 – 10	0 - 10	0 - 8
NAS Neck post	Mean	2.5	2.5	2.5	2.4
	SD	2.6	3.0	2.8	3.2
	Median	1.5	1.0	1.5	0.0
	Range	0	0	0	0
Delta prä/ post	Mean	-0.8	-0.5	-1.1	-0.1
	SD	2.7	4.2	3.2	3.4
	Median	0	0	0	0
	Range	-8 - 5	-9 - 7	-10 -3	-8 - 6

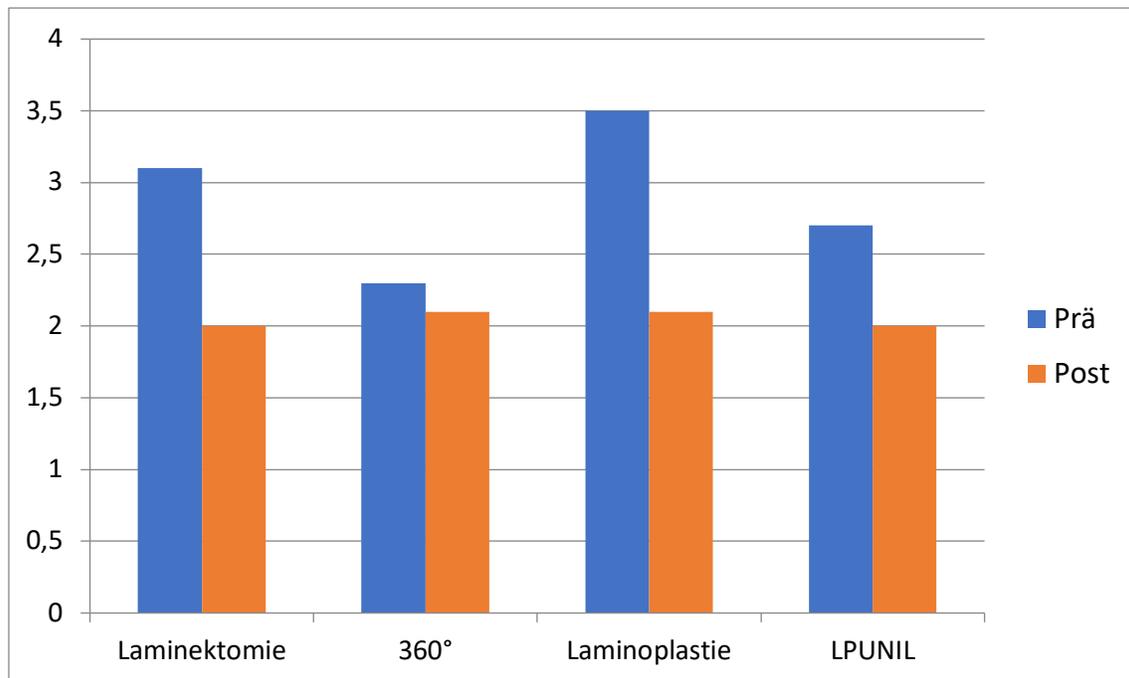


Abb. 40: Prä- und postoperative NAS Nacken Mittelwerte im Vergleich

Der NDI war präoperativ in der LX Gruppe sowie in der LPUNIL Gruppe deutlich höher als in den anderen Gruppen und zeigte hierdurch auch einen deutlicheren Unterschied zum postoperativen NDI mit einem Delta-Wert von -5,0 (LX) und -4,0 (LPUNIL). Somit verbesserte sich der NDI in diesen Gruppen deutlich, während die 360° und LPL Gruppe im Mittel keine Veränderung präoperativ zu postoperativ beim NDI aufwiesen. Auch der Deltawert mit 2,5 (360°) und 2,0 (LPL) spiegelten dies wider (Abb. 41). Einen statistisch signifikanten Unterschied zeigte sich zwischen den vier Gruppen nicht ($p = 0,124$).

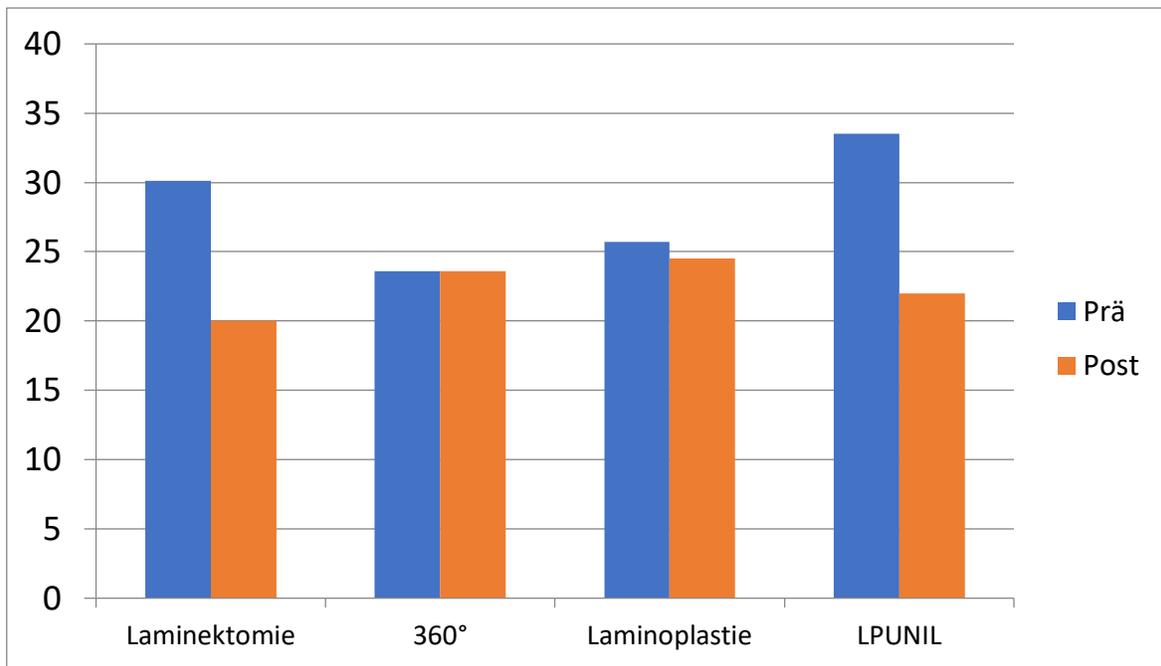


Abb. 41: NDI Mittelwerte prä-/ postoperativ im Vergleich

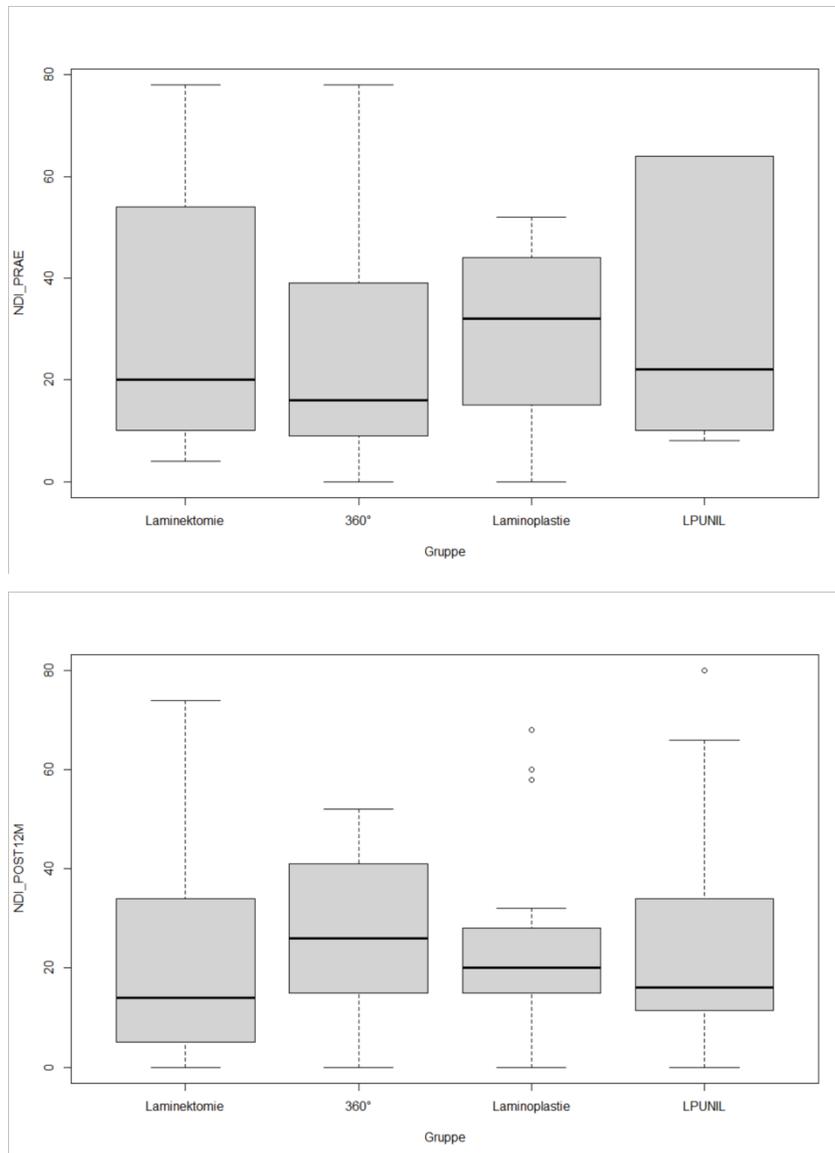


Abb. 42: NDI prä- und 12 Monate postoperativ im Vergleich

Die **Komplikationserfassung** der vier Gruppen zeigte eine Gesamtrate, d.h. spezifische und allgemeine Komplikationen, von 14,9%.

Dabei handelte es sich um sechs C5 Paresen (6,4%), vier (revisionbedürftige) Wundinfekte (4,3%), zwei Harnwegsinfekte (2,1%) sowie ein epidurales (revisionbedürftiges) Hämatom (1,1%) und eine substitutionsbedürftige Elektrolytentgleisung (1%).

Die Komplikationen zeigten sich innerhalb der vier Gruppen wie folgt verteilt:

LPL-Gruppe (n=22):

- ein postoperatives, revisionsbedürftiges Hämatom
- zwei C5 Paresen, die sich (ohne Revisionsbedürftigkeit) in den Nachuntersuchungen vollständig rückbildeten (AE 2)

LPUNIL -Gruppe (n= 22):

- eine Wundinfektion mit intraspinalen Abszess und resultierender Revisionsbedürftigkeit (AE 3)

LX- Gruppe (n= 28):

- drei postoperative C5 Paresen (zwei ohne (AE 2), eine mit Revisionsbedürftigkeit (AE 3). Erfreulicherweise bildeten sich alle vollständig zurück.
- eine Wundinfektion (AE 3)

360°- Gruppe (n= 22):

- eine C5 Parese, die sich ebenfalls regredient zeigte (AE 2)
- zwei Wundinfekte (AE 3) und drei „allgemeine“ Komplikationen (1x Elektrolytentgleisung, 2x Harnwegsinfekt (substituiert bzw. antibiotisch therapiert; AE 2)

Auf die vier Gruppen entfielen folgende Komplikationsraten:

- LPL: 13,6%
- LPUNIL: 4,5%
- LX: 14,3%
- 360°: 27,3%

5.2. Ergebnisse der FXA-Analyse

Die FXA-Analyse ergab folgende Ergebnisse:

- In der 360° Gruppe wurden 23 Patienten untersucht: 19 Patienten (82,6%) wurden in 3 Index-Segmenten operiert und 4 Patienten (17,4%) in 4 Index-Segmenten. 73 Index-Segmente wurden mittels FXA evaluiert.

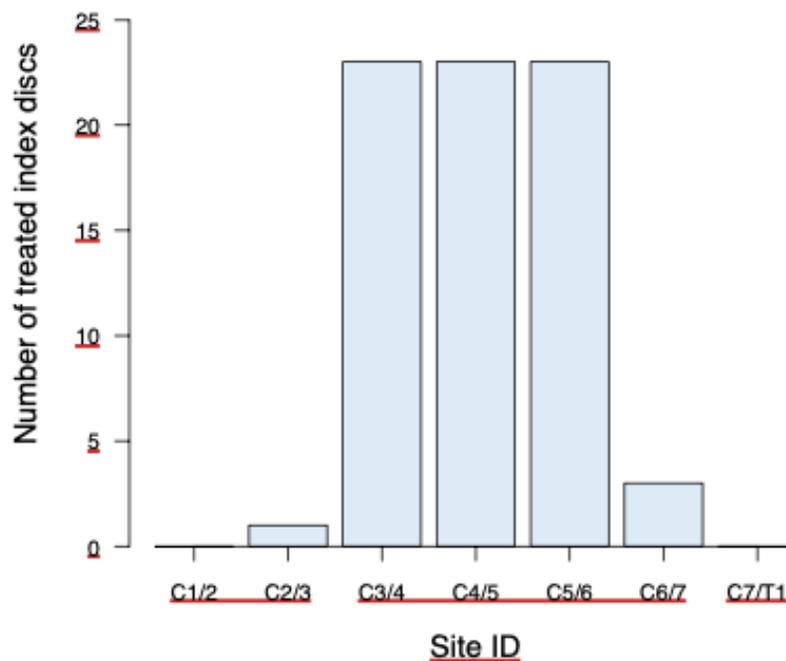


Abb. 43: Darstellung der untersuchten Index-Segmente der 360° Gruppe

- In der LX Gruppe wurden 27 Patienten untersucht: 23 Patienten (85,2%) wurden in 3 Index-Segmenten operiert und 4 Patienten (14,8%) in 4 Index-Segmenten. 85 Index-Segmente wurden mittels FXA evaluiert.

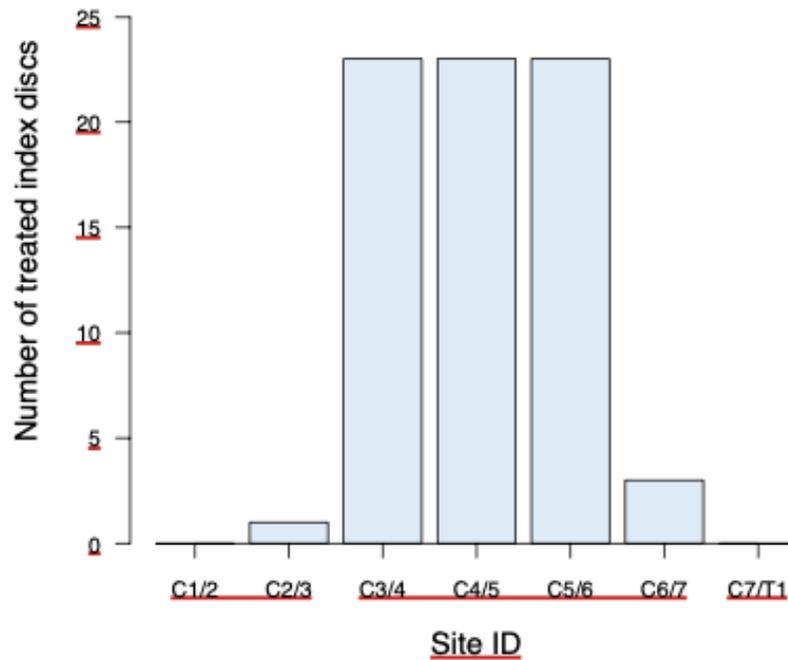


Abb. 44: Darstellung der untersuchten Index-Segmente der LX Gruppe

- In der LPL Gruppe wurden 20 Patienten untersucht: 5 Patienten (25%) wurden in 3 Index-Segmenten operiert und 15 (75%) in 4 Index-Segmenten. 75 Index-Segmente wurden mittels FXA evaluiert.

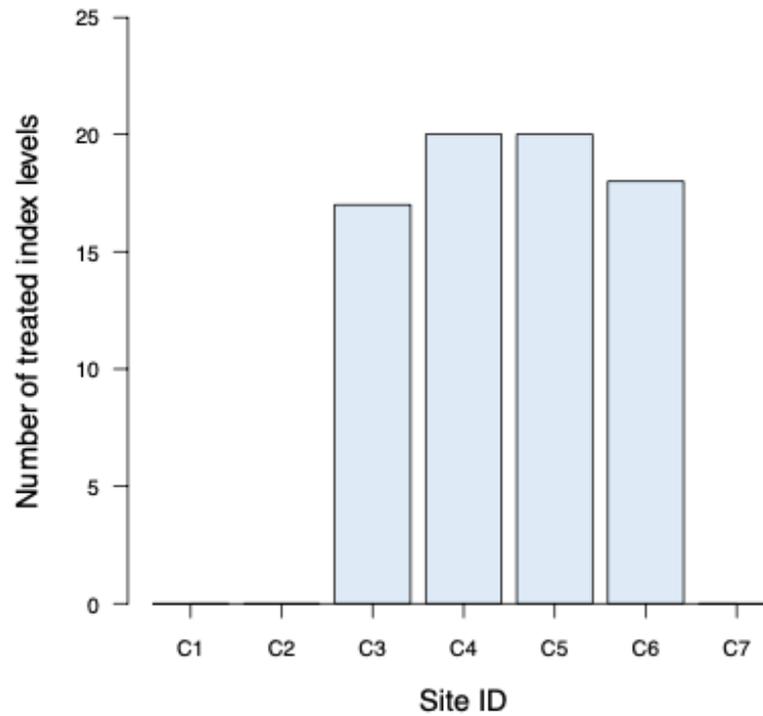


Abb. 45: Darstellung der untersuchten Index-Segmente der LPL Gruppe

- In der LPUNIL Gruppe wurden 22 Patienten untersucht: 1 Patient (4,5%) wurde in 2 Index-Segmenten operiert und 21 Patienten (95,5%) in 4 Index-Segmenten. 84 Index-Segmente wurden mittels FXA evaluiert.

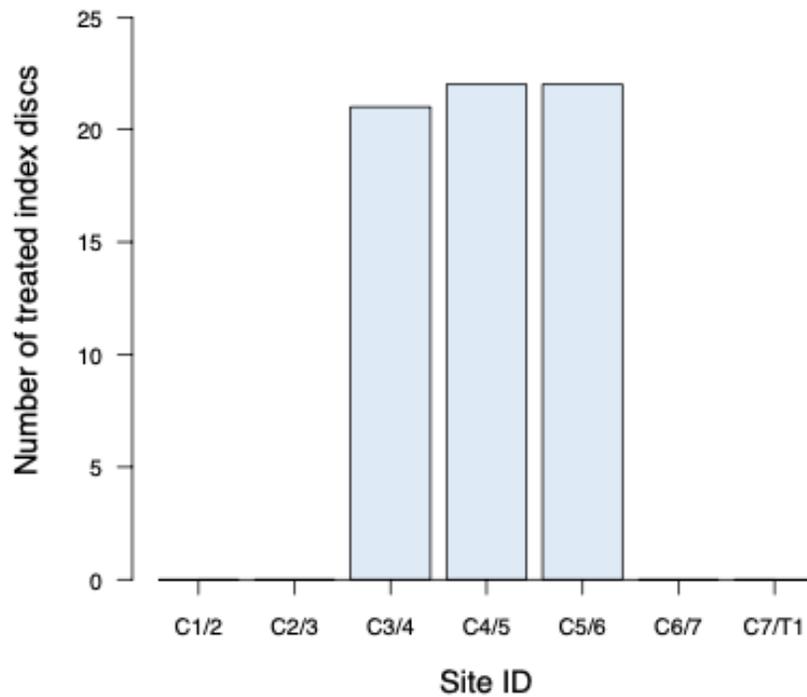


Abb. 46: Darstellung der untersuchten Index-Segmente der LPUNIL Gruppe

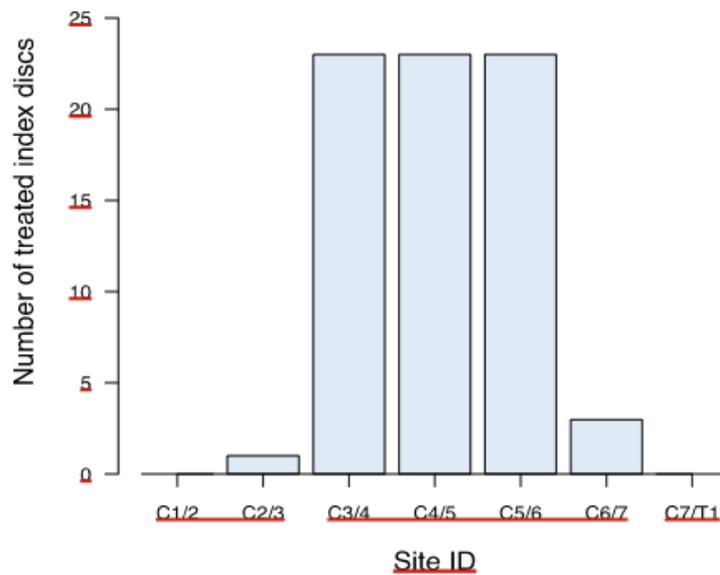


Abb. 47: Anzahl der operierten Index-Segmente

Die postoperative Range of Motion C3-6 (**ROM C3-6**) ist definiert als der Bewegungsumfang zwischen dem obersten Indexsegment C3 und dem untersten Indexsegment C6 und somit Indikator für die postoperative Fusionsrate. Die Fusionsrate wurde als Beweglichkeit $< 2^\circ$ definiert.

Die folgenden Boxplots veranschaulichen dies für die jeweilige Gruppe:

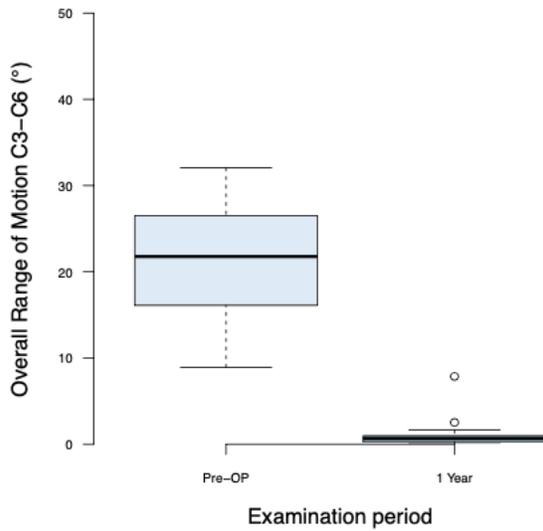


Abb. 48: C3-6 ROM 360°

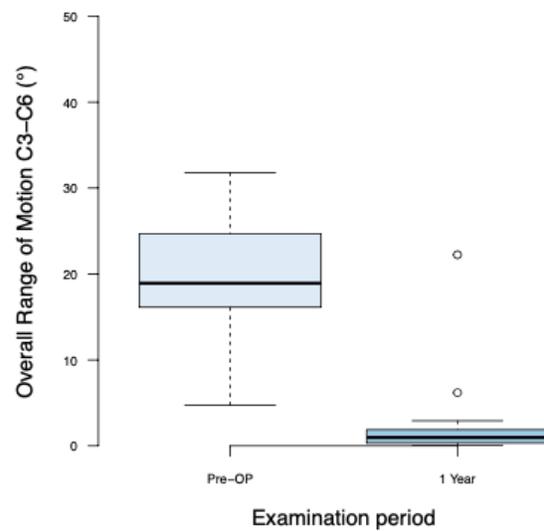


Abb. 49: C3-6 ROM Lx

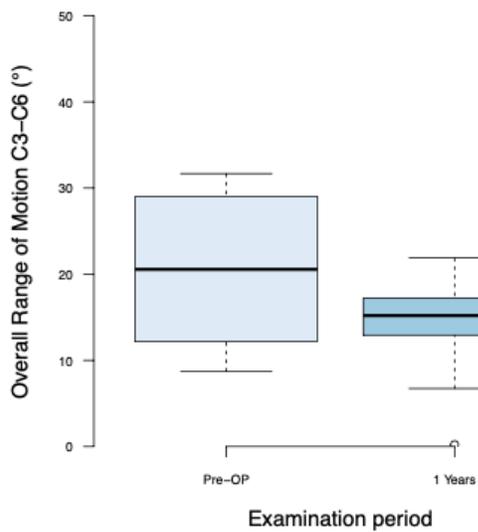


Abb. 50: C3-6 ROM LPL

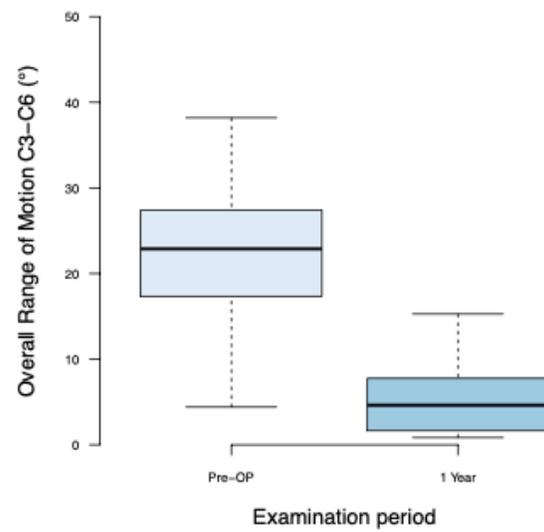


Abb. 51: C3-6 ROM LPUNIL

Auf die vier Gruppen entfielen somit die folgende Fusionsraten:

- 360°: 95%
- LX: 92%
- LPUNIL: 57%
- LPL: 5%

Die deutlichste Reduzierung der ROM C3-6 und damit die höchste Fusionsrate mit 95% kam erwartungsgemäß bei der 360° Gruppe zur Darstellung ($p < 0,001$), nachfolgend bei der LX Gruppe mit einer Rate von 92% ($p < 0,001$) sowie bei der LPUNIL Gruppe mit 57,1% ($p < 0,001$). In der LPL Gruppe konnte bei einer Fusionsrate von 5% die größte postoperative Beweglichkeit erhalten ($p < 0,006$) werden.

Tabelle 7: ROM C3-6 prä/post und Fusionsraten der 4 Gruppen

Gruppe	ROM C3-6 prä	ROMC3-6 post	Fusionsrate
360°	22	1	95%
LPL	21	14,4	5%
LPUNIL	23	5,3	57%
LX	20	2	92%

Die zervikale Lordose zeigte sich in der 360° Gruppe (prä/post 15°/11°) sowie in der LX Gruppe vermindert. Dies, wenn auch geringer, zeigte sich ebenfalls in der LPUNIL Gruppe (prä/post 19°/16°). In der LPL Gruppe hingegen nahm sie gering zu (prä/post 18°/20°).

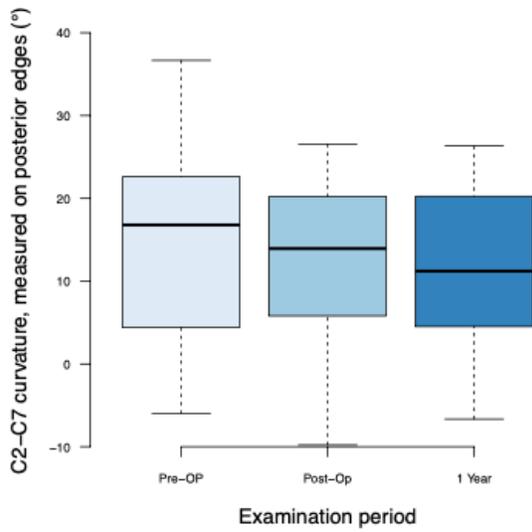


Abb. 52: C27PL der 360° Gruppe prä/post

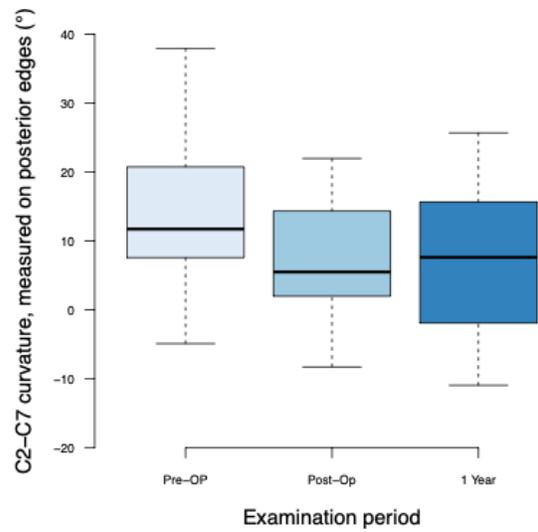


Abb. 53: C27PL der LX Gruppe prä/post

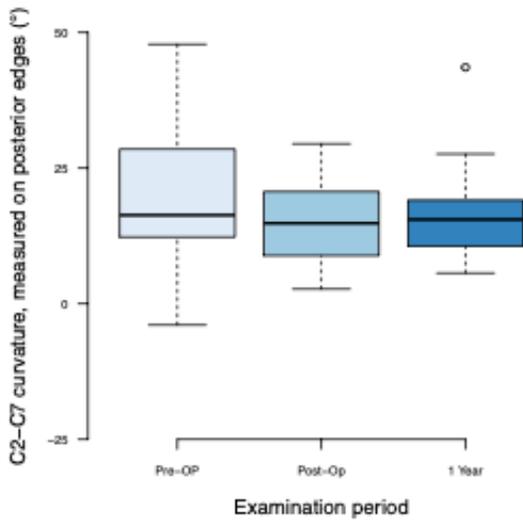


Abb. 54: C27PL der LPL Gruppe prä/post

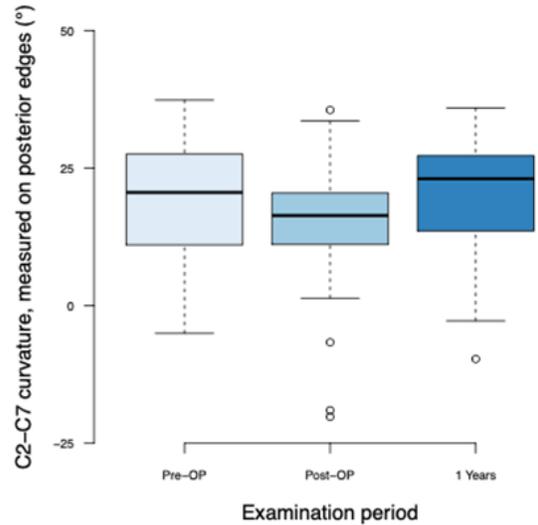


Abb. 55: C27PL der LPUNIL Gruppe prä/post

Die **kraniozervikale Lordose (C0-2)** zeigte sich prä- zu postoperativ nach einem Jahr unverändert in der LPUNIL Gruppe.

In der LPL (mean prä/post 18°/20°) und 360° Gruppe (mean prä/post 27°/29°) jedoch zeigte sich ebenso wie in der LX Gruppe (mean prä/post 18°/20°) mit zunehmender Fusion auch eine Zunahme von bis zu 5° im prä-/ postoperativen Vergleich.

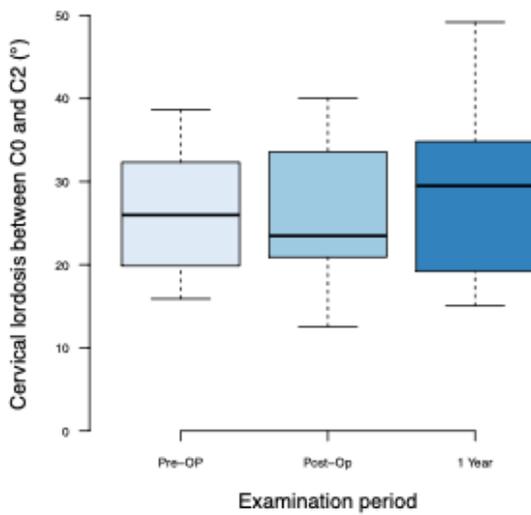


Abb. 56: C0-2 prä/post 360° Gruppe

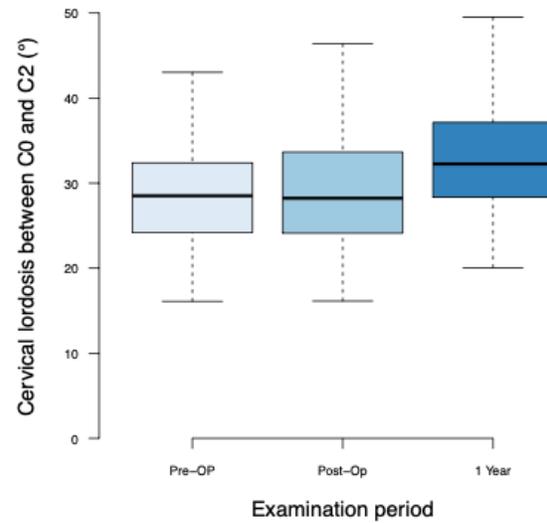


Abb. 57: C0-2 prä/post LX Gruppe

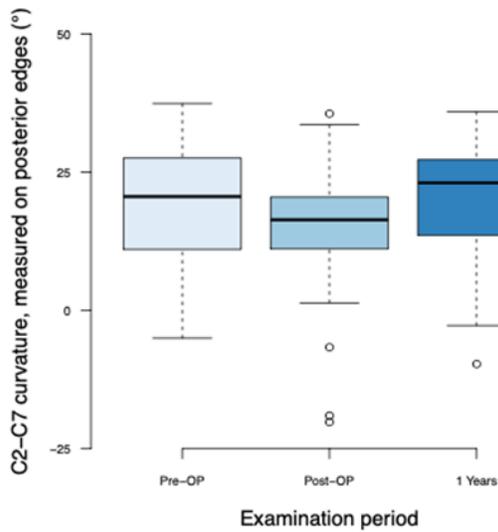


Abb. 58: C0-2 prä/post LPL Gruppe

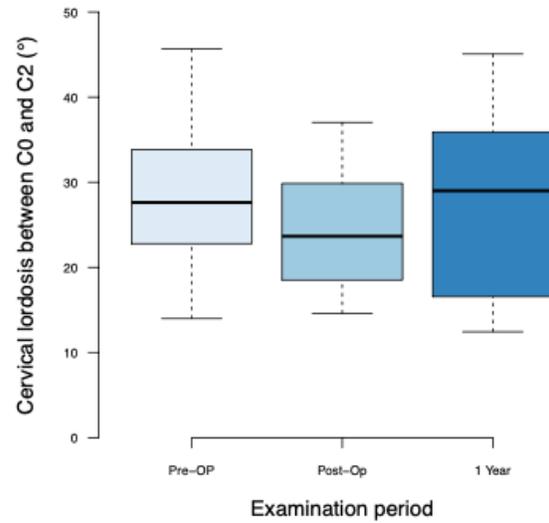


Abb. 59: C0-2 prä/post LPUNIL Gruppe

Die postoperative SVA C2C7 nahm gering in den Gruppen 360° (mean prä/post 26mm/30mm), LX (mean prä/post 30mm/34mm) und LPUNIL (mean prä/post 26mm/28mm) zu. In der LPL Gruppe zeigte sich unverändert (mean prä/post 28mm/28mm).

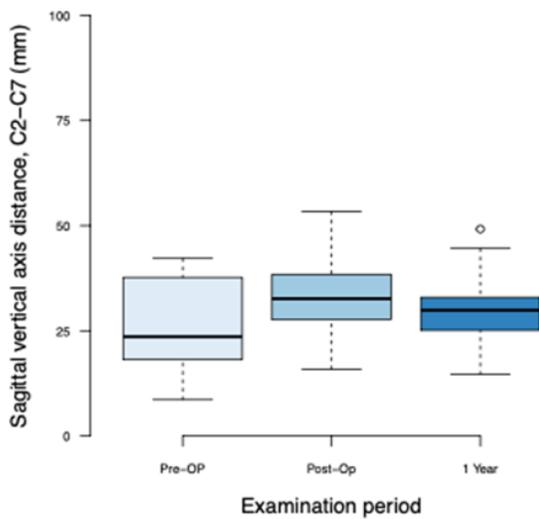


Abb. 60: SVA C2C7 360°

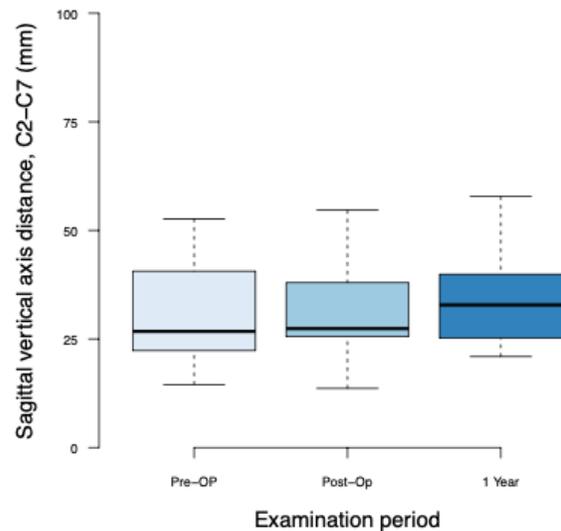


Abb. 61: SVA C2C7 LX

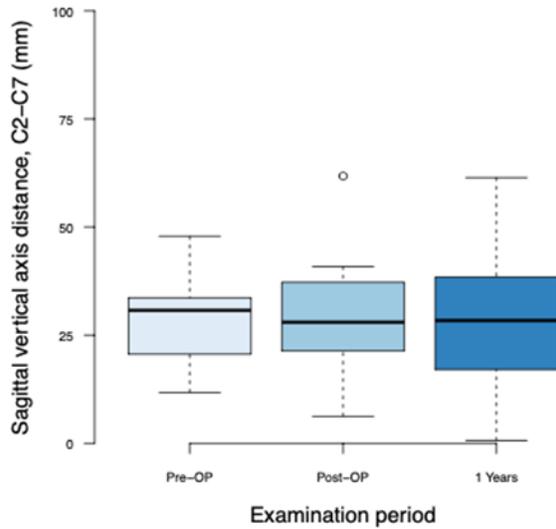


Abb. 62: SVA C2C7

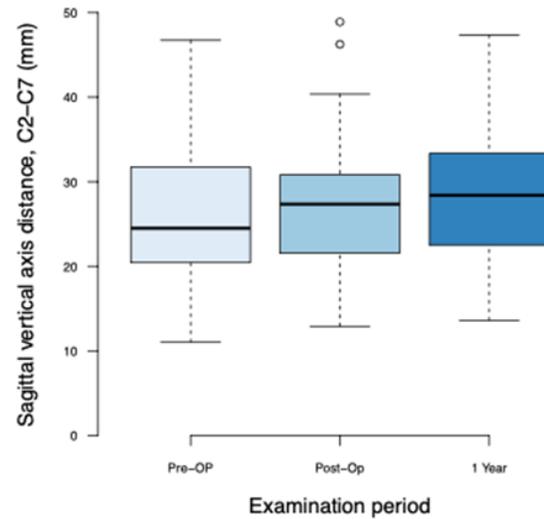


Abb. 63: SVA C2C7 LPUNIL

5.3. MRT Auswertung

Es konnten 79 Patienten mit prä- und postoperativem MRT ausgewertet werden. Der postoperative Durchmesser des Spinalkanals auf Höhe der Bandscheibenfächer C3/4, C4/5, C5/6, und C6/7 war, verglichen mit dem präoperativen Wert, erhöht. Das Ausmaß der Dekompression war in der 360° Gruppe am größten und in der LPL Gruppe am geringsten (z. B: 360° C4/5: 7,4 vs. LPL C4/5: 3,4). Bei dieser Gruppe war jedoch die präoperative Einengung geringer ausgeprägt. Insgesamt zeigten sich in allen vier Gruppen hohe Effektstärken (Tab. 8, Abb. 64).

Tabelle 8: Vergleich des prä- und postoperativen Durchmessers des Spinalkanals im MRT

		LX	360°	LPL	LPUNIL
	N	22	18	20	19
C3/4	Prä	6.4 ± 2.5	5.0 ± 2.1	7.5 ± 2.1	6.7 ± 2.4
	Post	11.9 ± 2.0	13.2 ± 2.3	10.4 ± 2.1	10.9 ± 1.5
	Delta	5.8 ± 2.5	8.4 ± 3.8	2.7 ± 1.5	3.6 ± 2.0
C4/5	Prä	5.7 ± 1.9	5.8 ± 2.4	6.5 ± 1.4	5.4 ± 2.3
	Post	12.8 ± 1.8	13.3 ± 2.8	10.0 ± 1.9	11.3 ± 2.2
	Delta	7.2 ± 2.3	7.4 ± 3.6	3.4 ± 2.1	5.9 ± 1.7
C5/6	Prä	7.0 ± 2.3	6.6 ± 2.6	6.7 ± 1.7	6.0 ± 1.9
	Post	12.7 ± 2.0	12.3 ± 2.9	9.6 ± 1.6	10.1 ± 2.7
	Delta	5.7 ± 2.7	5.7 ± 3.6	2.9 ± 2.5	4.2 ± 2.3
C6/7	Prä	8.6 ± 2.5	7.9 ± 3.0	7.7 ± 1.7	6.7 ± 2.1
	Post	11.1 ± 2.2	10.3 ± 2.9	9.1 ± 1.8	8.5 ± 2.0
	Delta	2.5 ± 2.2	2.5 ± 2.7	1.4 ± 1.9	1.8 ± 2.1

(Alle Angaben in mm)

Die Boxplots veranschaulichen die postoperative Erweiterung des Spinalkanals für jedes Segment:

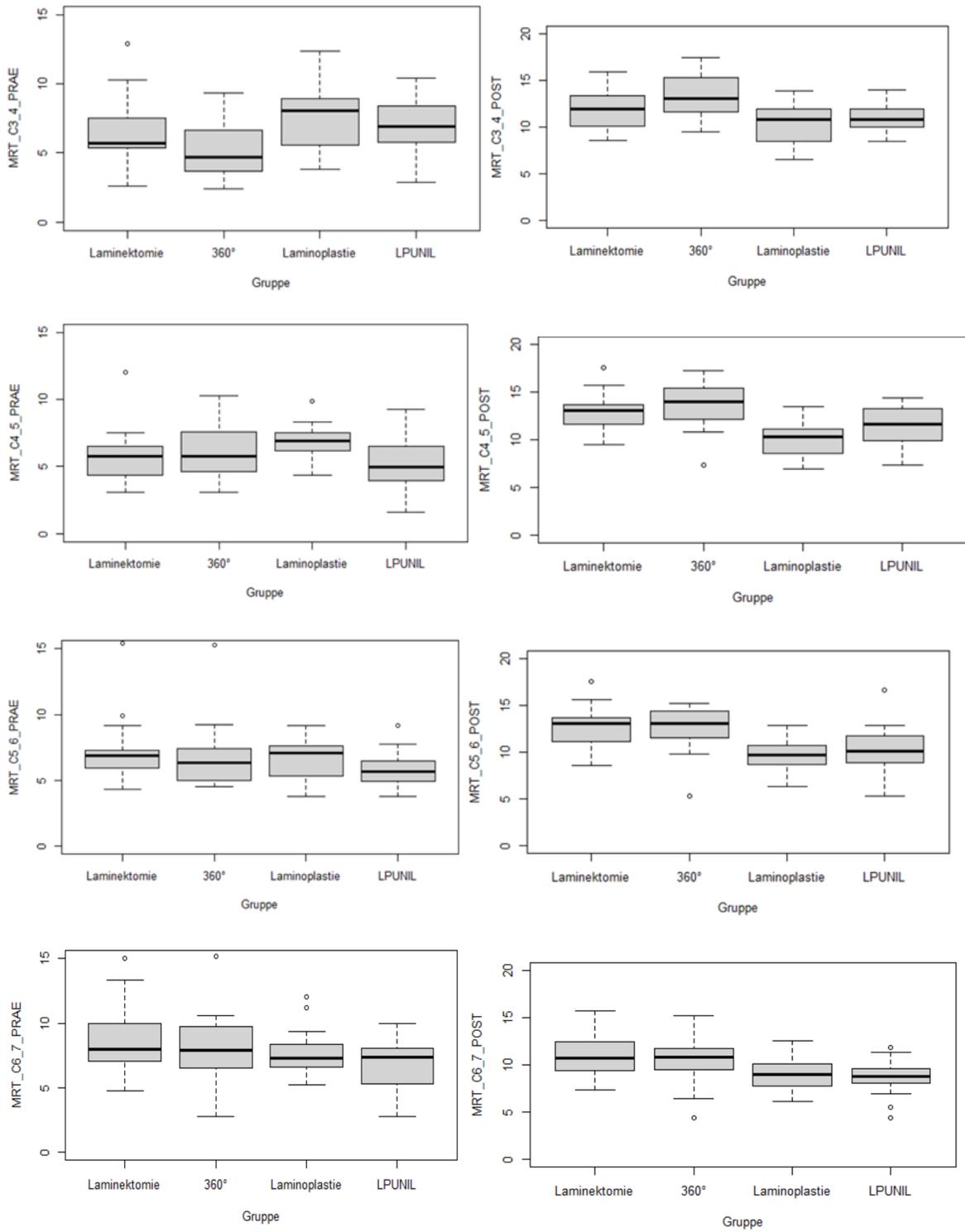


Abb. 64: Durchmesser des Spinalkanals für jedes Segment im prä-/ postop. Vergleich

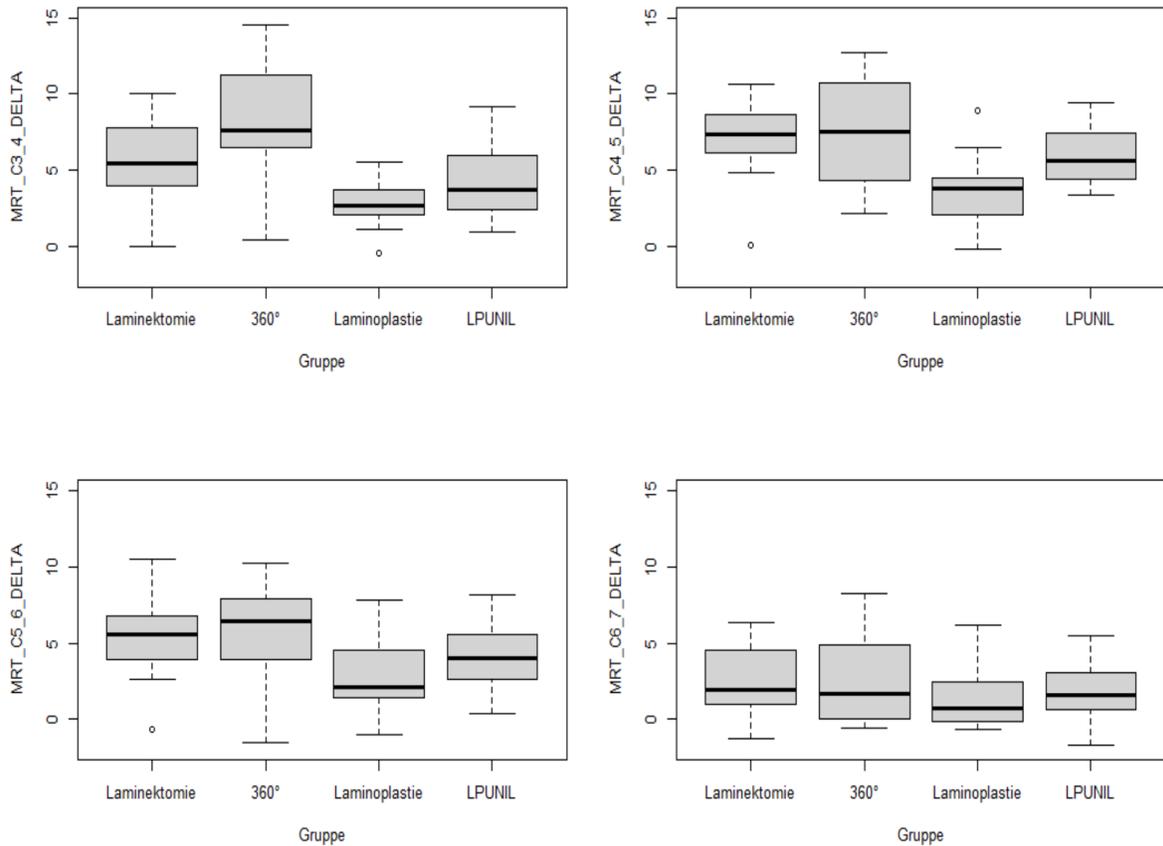


Abb. 65: Wirksamkeit der Erweiterung des Spinalkanals durch die vier OP-Techniken im Segmentvergleich

Im Segmentvergleich wurde in den Segmenten C3/4 und C4/5 die größte Dekompression erzielt. Im Gruppenvergleich wurde in der 360° Gruppe die größte Dekompression erreicht und in der LPL Gruppe die geringste (Abb. 65).

Die dorsale Verlagerung des Myelons nach der Dekompression kam im Segment C4/5 am deutlichsten zur Darstellung. Dies kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass sehr häufig C4/C5 präoperativ dem Scheitelpunkt der HWS-Lordose entspricht.

In den Abb. 66 und 67 werden die Werte der vier Dekompressionstechniken für jedes Segment miteinander verglichen.

Die Werte der LX und der 360° Gruppe liegen von der Winkelhalbierenden deutlich weiter weg als z.B. jene der LPL Gruppe: letztere bedeuten, dass es postoperativ keine große Veränderung zu präoperativ gibt.

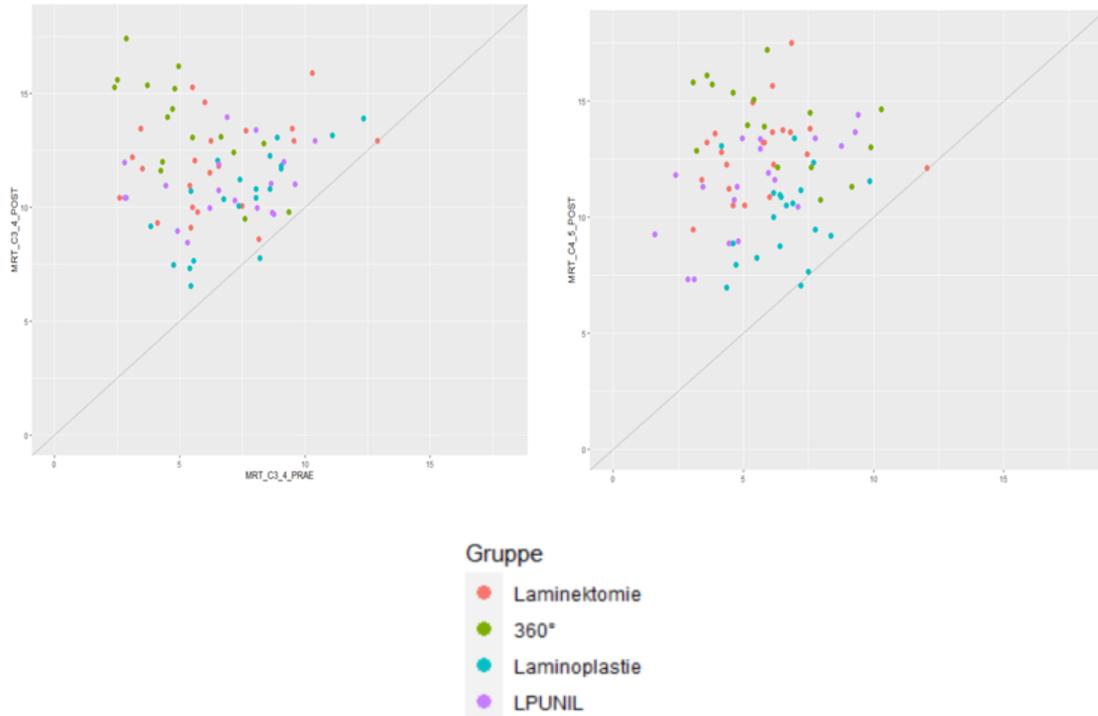


Abb. 66: C3/4 & C4/5: Dekompressionstechniken im Vergleich a) präop. und b) postop..

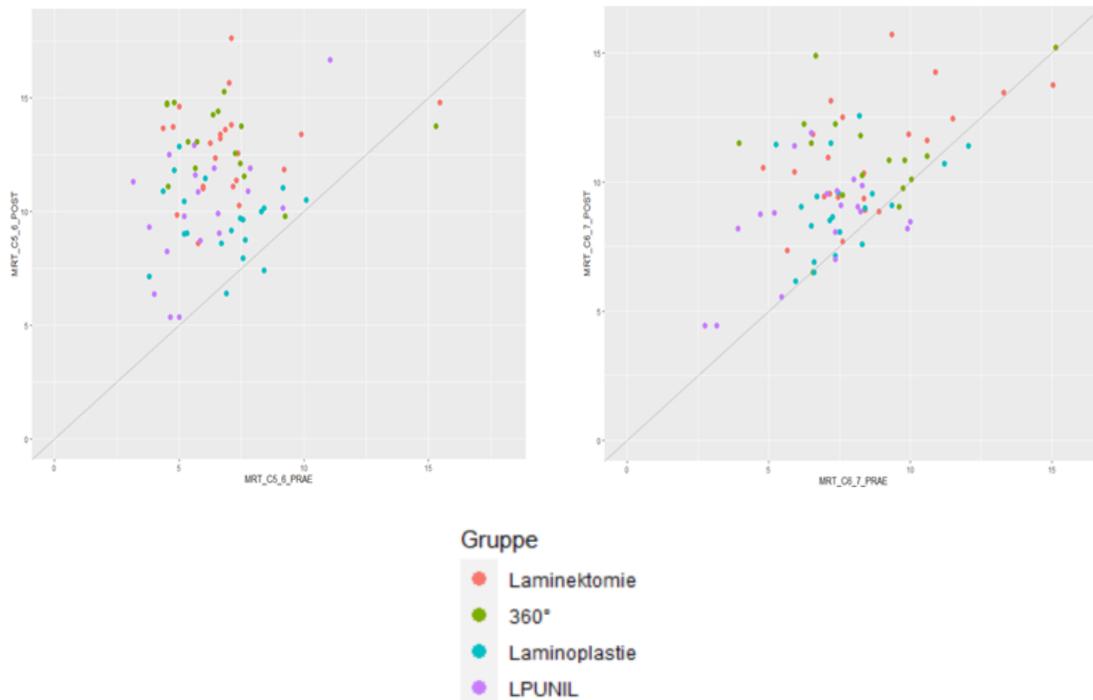


Abb. 67: C5/6 & C6/7: Dekompressionstechniken im Vergleich a) präop. und b) postop.

Dieses Phänomen ist, weniger ausgeprägt, auch in den Segmenten C5/C6 und C6/C7 erkennbar. Zusammenfassend zeigte sich, dass

- keine signifikante Korrelation zwischen dem Ausmaß der Dekompression und der Veränderung der klinischen Parameter NAS Neck, NAS Arm, NDI, EQ-5D und EMS bestand.
- dass auch eine geringe Dekompression, beispielsweise im Segment C4/5, eine klinische Befundbesserung bewirkte, ohne eine ausgeprägte Verlagerung des Myelons mit erhöhtem Risiko einer C5 Parese zur Folge zu haben.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Recovery Rate und dem Alter, dem Geschlecht, der ASA oder der OP-Zeit zeigte sich nicht.

Die neurologische Erholungsrate der Patienten korrelierte mit der gleichzeitigen Verbesserung von Arm-/ und Nackenschmerzen (Korr. -0,33 bzw. -0,23).

Die RR korrelierte weder mit dem präoperativen EQ-5D (Korr.=0,05) noch mit dem postoperativen EQ-5D (Korr.=0,09). Die subjektive Wahrnehmung der einzelnen Patienten, die beim Ausfüllen des Fragebogens zum Ausdruck kam, spiegelte die RR nicht wider.

5.4. Kostenanalyse

Die Indikation zur operativen Therapie wurde im Einzelfall anhand der klinischen und bildgebenden Befunde getroffen. Volkswirtschaftlich betrachtet, ist die Kostenanalyse ein wichtiger Parameter, um den Ressourcenverbrauch zu optimieren.

Die Gesamtkosten eines Eingriffes (Tab. 11) ergaben sich aus der Addition der durchschnittlichen Kosten pro OP-Minute (Tab. 9, Abb. 68) und der Implantatkosten (Tab. 10). Die Kosten einer OP-Minute wurden mit durchschnittlich 50€ berechnet.

Tabelle 9: OP-Dauer der vier Operationstechniken

		LX	360°	LPL	LPUNIL
OP-Zeit	Mean	137	203	118	119
	SD	37	51	33	49
	Median	134	188	125	95
	Range	76 – 210	143 – 357	61 – 168	72 - 224

(Alle Angaben in Minuten)

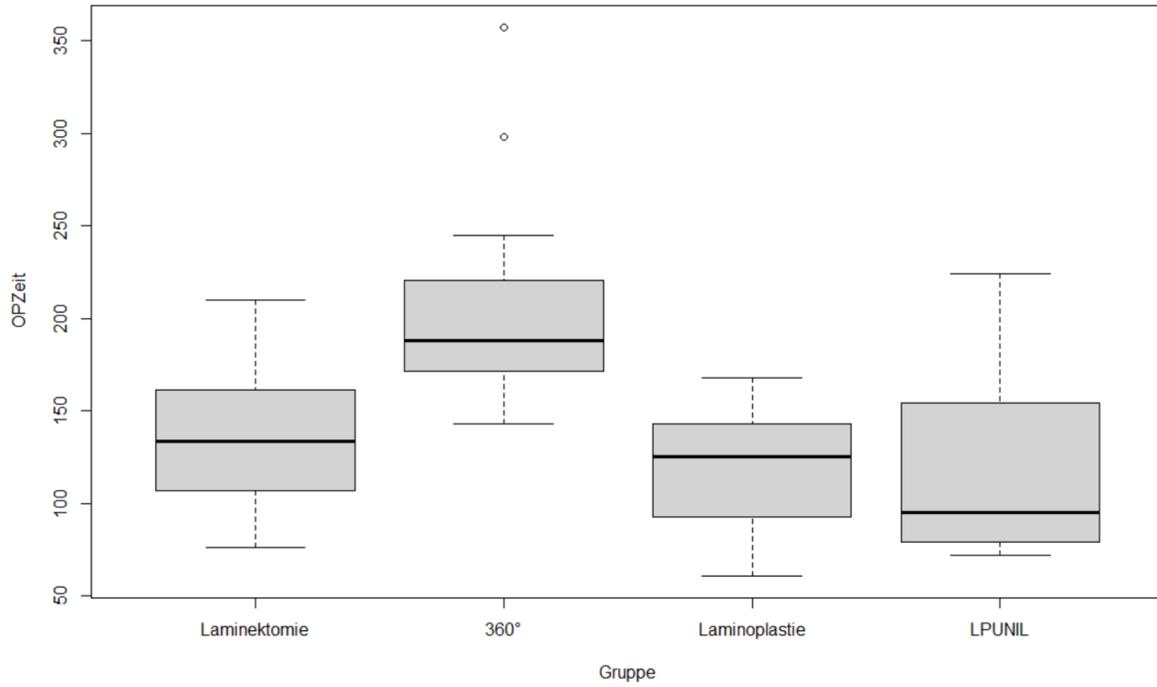


Abb. 68: Boxplot OP-Dauer

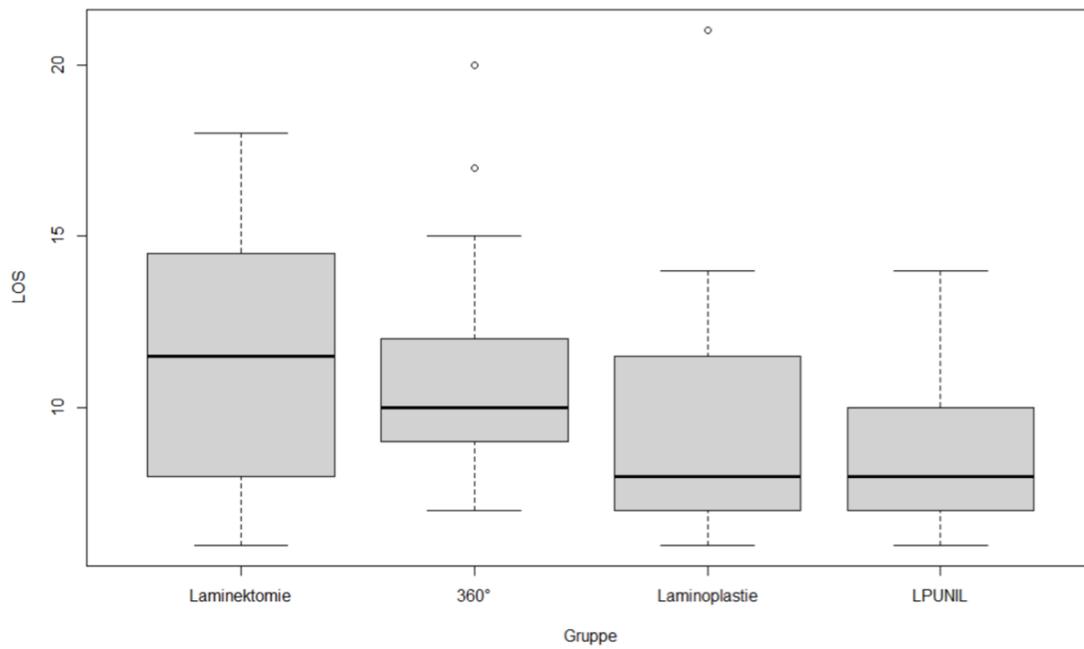


Abb. 69: Boxplot Stationäre Verweildauer in Tagen

Tabelle 10: Implantatkosten

Eingriff	Artikelbedarf Implantate	Gesamtkosten Implantate
Laminektomie + Fusion (4 Segmente)	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Bohrer - 8 polyaxiale Schrauben (3,5 mm) - 8 Verschlusschrauben - 2 Stäbe 	2.217,60 €
Laminoplastie (4 Segmente)	<ul style="list-style-type: none"> - 4 Plättchen - 8 Schrauben (System A) 	146,96 €
	<ul style="list-style-type: none"> - 4 Plättchen - 8 Schrauben (System B) 	537,60 €
Laminoplastie + Unilat. Fusion (4 Segmente)	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Bohrer - 4 polyaxiale Schrauben (3,5 mm) - 4 Verschlusschrauben - 1 Stab - 4 Plättchen - 4 Schrauben 	1.574,30 €
ACCF + dors. Spondylodese (ventral: 1 Segment, dorsal: 3 Segmente)	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Wirbelkörperersatz - 1 Bohrer - 6 polyaxiale Schrauben (3,5 mm) - 6 Verschlusschrauben - 2 Stäbe 	2.853,60 €

Tabelle 11: Orientierende Gesamtkosten der vier Operationstechniken

Eingriff	Kosten OP-Minuten (Median)	Gesamtkosten (OP-Minuten + Implantate)
Laminektomie + bilaterale Fusion (4 Segmente)	137 x 50 = 6850 €	9.067,60 €
Laminoplastie (4 Segmente)	18x50=5.900 €	6.046,96 € (Syst. A) 6.437,60 € (Syst. B)
Laminoplastie + unilaterale Fusion (4 Segmente)	119x50=5.950 €	7524,30 €
ACCF + dorsale Spondylodese (ventral: 1 Segment, dorsal: 4 Segmente)	203x50= 10.150 €	13.003,60 €

6. Diskussion

Die degenerative zervikale Myelopathie ist die häufigste degenerative Erkrankung der Wirbelsäule bei Patienten über 55 Jahren. Infolge der zukünftigen Verschiebung der Alterspyramide ist mit einer weiteren Zunahme der Erkrankung zu rechnen (Wilson et al., 2017). Auch die Anzahl von Patienten mit schwerwiegenden Begleiterkrankungen steigt: die Auswahl der individuellen Therapieempfehlung, insbesondere der operativen, wird immer wichtiger und sollte auf die individuelle Befundkonstellation maßgeschneidert werden.

Die Laminoplastie über einen beidseitigen Zugang und die Laminektomie in Kombination mit einer dorsalen Stabilisierung gelten als Standard der operativen Dekompression einer mehrsegmentalen Stenose bei erhaltener zervikaler Lordose (Bartels et al., 2015). Deshalb wurden in der Literatur bislang nur diese Eingriffe miteinander verglichen oder diese dorsalen Techniken den ventralen Verfahren (ACDF, ACCF, ggf. mit Plattenosteosynthese) gegenübergestellt.

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, wie klinische Ergebnisse, Ausmaß der Dekompression des Rückenmarkes und sagittales Profil der HWS sich nach Behandlung mit vier unterschiedlichen Operationstechniken unterscheiden.

Die vier Operationstechniken waren: 1. Laminoplastie über einseitigen Zugang, 2. Laminoplastie über einseitigen Zugang mit zusätzlicher einseitiger Instrumentation, 3. Laminektomie mit beidseitiger Instrumentation und 4. Kombinierte ventro-dorsale Dekompression mit dorsaler bilateraler Instrumentation.

Es wurden folgende Parameter ausgewertet: klinische und radiologische Ergebnisse, Komplikationsraten und Kosten (Benzel et al., 1991; Carol et al., 1988; Kaminsky et al., 2004).

Die Laminoplastie über einseitigen Zugang mit zusätzlicher einseitiger Instrumentation und kombinierte ventro-dorsale Verfahren wurden bislang in der Literatur nicht evaluiert. Der unilaterale Zugang bei Laminoplastie wurde erstmals 2000 von Roselli beschrieben (Roselli et al., 2000). Als Vorteile des Verfahrens wurden hauptsächlich die reduzierte postoperative Muskelatrophie und ein geringeres Wundinfektionsrisiko hervorgehoben. Leider hat diese

Operationstechnik aufgrund ihres Schwierigkeitskoeffizienten keine weite Verbreitung erlangt.

Die Laminoplastie über einseitigen Zugang mit zusätzlicher unilateraler Instrumentation (Massae laterales Schrauben-Stab-System) wurde vor wenigen Jahren in unserer Klinik entwickelt. Ziele waren:

1. Das Indikationsspektrum auch auf Patienten mit ausgeprägten präoperativen Nackenschmerzen, als Hinweis auf die Instabilität der HWS, zu erweitern.
2. Das Risiko der postoperativen Kyphose, eine der konventionellen Laminoplastie inhärente Nebenwirkung, zu reduzieren.

In einer biomechanischen Studie (Schmeiser et al., 2015) konnte gezeigt werden, dass die unilaterale Stabilisierung im Vergleich mit der bilateralen gleichwertig ist. Der Vorteil: mit einem geringeren Weichteiltrauma wird eine vergleichbare Stabilität erzielt.

In den bisherigen anatomischen und klinischen Studien konnte nachgewiesen werden, dass keine relevanten Unterschiede zwischen den gängigen dorsalen OP-Techniken hinsichtlich des Ausmaßes der Dekompression bestehen (Wang et al., 2006; Yang et al., 2013). Auch das postoperative Outcome der Patienten war vergleichbar (Albert et al., 1998; Kato et al., 2017).

Dieser Sachverhalt bestätigte sich auch in unserer Studie. Die Gegenüberstellung der vier Operationstechniken zeigte, dass alle Patienten von dem operativen Eingriff profitierten. Am Beispiel der Symptomatik der DCM ist die Tatsache erwähnenswert, dass vergleichbar mit den etablierten Verfahren wie Open-Door Laminoplastie und Laminektomie, auch die 360°-Operation und die LPUNIL-Technik den postoperativen EMS um bis zu 3 Punkte verbesserten. Der postoperative Nacken-/ Armschmerz bildete sich im Vergleich zu präoperativ durchschnittlich um 3 Punkte zurück. Der NDI besserte sich nach einem Jahr um durchschnittlich 8 Punkte.

Die durchschnittliche OP-Dauer der LPUNIL und der LPL (95 min) war kürzer als die der LX-Eingriffe (134 min) oder des 360° Verfahrens (188 min).

Analog dazu war der stationäre Aufenthalt der Patienten nach LPUNIL und LPL kürzer (9 Tage) als nach LX (12 Tage) oder nach 360° (11 Tage). Die Daten bezüglich OP-Dauer und

stationären Aufenthalt ergeben eine klare Trennlinie zwischen aufwendigeren, d.h. für die Patienten belastenderen, Eingriffen wie LX und 360° und operativ weniger traumatisierenden wie LPUNIL und LPL (Abb. 69).

Wir haben gelernt, dass nur bei mehrsegmentaler Instabilität und/oder fixierter Kyphose eine 360° Versorgung notwendig ist. Falls es das präoperative sagittale Profil zulässt, kann eine ausreichende Dekompression des Myelons auch durch eine weniger traumatisierende LPL erreicht werden. Zur Vorbeugung einer sekundären Kyphose bei präoperativ neutralem Profil oder bei ausgeprägten Nackenschmerzen haben wir die Wirksamkeit einer zusätzlichen unilateralen Instrumentation untersucht.

In anderen Worten: die Ergebnisse der vorliegenden Studie beeinflussen unsere klinische Entscheidungsfindung. Bei gleicher „operationstechnischer“ Wirksamkeit wird, unter Berücksichtigung der häufig ausgeprägten Komorbiditäten der Patienten, die weniger belastende Operation bevorzugt.

Dies wiederum beeinflusst kurzfristig die Zusammenstellung des operierenden Teams und längerfristig die Ausbildung des einzelnen Operateurs. Ein Ausweichen auf einen belastenderen Eingriff, weil „man nur diese Technik beherrscht“ oder sogar, weil erlöstechnisch lukrativer, ist keine Option!

Obwohl die Mehrheit der Patienten von dem Eingriff profitiert haben, berichteten einige über Restbeschwerden. Bemerkenswert war, dass obwohl es das erste Ziel der operativen Therapie war die Progredienz der Symptomatik zu verhindern, sich die Myelopathie-Symptomatik aller Patienten postoperativ gebessert hat. Dies zeigte sich in einer Verbesserung von 1 (LPL) bis zu 3,5 (360°) Punkten sowie einer Recovery Rate von über 20% in allen Gruppen. Die Patienten berichteten direkt poststationär oder am Ende einer Reha-Maßnahme über eine spürbare Rückbildung der Gangunsicherheit und über eine Verbesserung der Fingerfeinmotorik. Wenige Monate später nahmen sie diesbezüglich jedoch erneut eine Verschlechterung wahr. Es zeigte sich auch eine Korrelation zwischen niedrigem präoperativen EMS und unbefriedigenderem postoperativen Ergebnis.

Dies entspricht den Angaben in der Literatur (Chung et al., 2002; Handy et al., 2002), bestärkt uns aber auch in unserer Ansicht, bereits bei milder Symptomatik die frühzeitige operative

Therapie zu empfehlen. Bei rascher Progredienz der Myelopathie ist sie ohnehin dringlich geboten (Tschugg et al., 2018; Fehlings et al., 2013; Fehlings et al., 2015).

Als häufigste postoperative Beschwerden wurden von den Patienten „Nackenschmerzen“ genannt. Dies entspricht den Angaben in der Literatur (Hosono et al., 2006). Insbesondere nach den dorsalen Dekompressionsverfahren (LPL und LX) werden Nackenschmerzen als persistierend, ausgeprägter oder sogar neu aufgetreten angegeben (Cho et al., 2010; Hosono et al., 1996; Yoshida et al., 2002).

Als mögliche Gründe werden die zugangsbedingte Ablösung der Muskelansätze von den Dornfortsätzen des zweiten bzw. siebten Halswirbelkörpers oder die Durchtrennung der tiefen Extensorenmuskulatur (Cho et al., 2010; Iizuka et al., 2001) genannt. Hosono et al. machen für die Nackenschmerzen eine Ischämie der Schultermuskulatur, eine Atrophie der Nackenmuskulatur oder eine verzögerte Fusion der Facettengelenke als weitere Gründe verantwortlich (Hosono et al., 1996). Dem „Erhalt“ des Dornfortsatzes HWK7 und somit der Verbesserung der HWS-Stabilität wird in der Reduzierung von postoperativen Nackenbeschwerden eine besondere Bedeutung zugesprochen (Pal et al., 1996).

In unserer Studie zeigte sich kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der postoperativen Nackenschmerzen zwischen den „invasiveren“ Operationstechniken (LX bzw. 360°) mit beidseitiger Präparation der Nackenmuskulatur im Vergleich zu den weniger traumatisierenden Verfahren (LPL und LPUNIL) mit einseitiger Präparation der Nackenmuskulatur. Vielleicht war die geringe Patientenzahl der Grund, weswegen sich der zu erwartende Zusammenhang zwischen schonenderem Zugangsweg und geringeren Nackenschmerzen nicht darstellte.

Es ist ein akzeptierter Standard die LX mit einer beidseitigen Instrumentation zu kombinieren, um sowohl bestehende Instabilitäten zu behandeln als auch das Auftreten einer postoperativen Kyphose zu reduzieren (Albert et al., 1998). Dieser Korrekturverlust macht sich klinisch durch persistierende Nackenschmerzen bemerkbar.

Auch nach LPL ist das Risiko einer postoperativen Kyphose mit persistierenden oder zunehmenden Nackenschmerzen zu beachten. (Kato et al., 2017; Nowinski et al., 1993). In der Literatur wird dieses Risiko zwischen 30% und 60% angegeben (Hidai et al., 1999).

Obwohl Nackenschmerzen bei weitem nicht die neurologische Gefährdung der Myelopathie beinhalten, „überschatten“ sie in der subjektiven Wahrnehmung der Patienten oft den klinischen Erfolg des postoperativen Stillstandes oder sogar der Rückbildung der Myelopathie.

Aus diesem Grund haben wir die LPL als LPUNIL weiterentwickelt.

Das Ziel war es, mittels der zusätzlichen einseitigen Stabilisierung das Risiko oder zumindest den Grad der postoperativen Kyphose zu minimieren.

Deshalb analysierten wir in der vorliegenden Studie auch das sagittale Profil und die prä-/postoperative Beweglichkeit der HWS anhand von röntgenologischen Funktionsaufnahmen.

Für die röntgenologische Auswertung wurde die neue digitale FXA-Methode (Functional X-Ray Analysis, Raylytic) verwendet, die vollautomatisch den Prozess der „Datenextraktion“ komplett „Untersucher-unabhängig“ mit größtmöglicher Präzision ermöglicht.

Als Fusion wurde eine Beweglichkeit unter 2° in In- und Reklination in den konventionellen Röntgenaufnahmen definiert. Die FXA-Messungen bestätigten die zu erwartende geringere postoperative Beweglichkeit zwischen HWK3 und HWK6 (ROM C3-6).

Es zeigte sich somit, dass je *rigider* die Instrumentierung der jeweiligen Op-Technik gewählt wurde, desto *höher* war die postoperative Fusionsrate.

Die Fusionsrate war nach einem Jahr in der LX Gruppe (92%) höher als in der LPUNIL Gruppe (57%). Die Schlussfolgerung ist, dass zwar die unilaterale Fusion das Risiko einer postoperativen Kyphose deutlich reduziert, jedoch eine etwas geringere Fusionsrate als die bilaterale Fusion zeigt. Ein hierdurch möglicherweise bedingtes Implantatversagen zeigte sich in den bisherigen Follow-Up Untersuchungen jedoch bislang nicht.

Eine endgültige Beurteilung wird aber, ebenso wie die Frage, ob diese Restbeweglichkeit mittel- und langfristig für den klinischen Verlauf relevant ist, erst nach einem längeren Zeitraum möglich sein.

Andere radiologische Parameter wie SVA und HWS-Lordose änderten sich in allen vier Gruppen nach einem Jahr nicht signifikant im Vergleich zum präoperativen Wert.

Lediglich in der LX Gruppe zeigte sich ein deutlicher postoperativer Verlust der HWS-Lordose (mean prä/post: 14°/7°). In den anderen drei Gruppen bestand dieser Verlust nicht (LPL mean prä/post: 18°/20°) oder war sehr gering: 360° Gruppe (mean prä/post: 15°/11°), LPUNIL (mean prä/post: 19°/16°)

Dieses Ergebnis wirkt paradox, berücksichtigt man die beidseitige Instrumentation der LX. Die Erklärung liegt in einem operationstechnischen Detail am Anfang unseres Untersuchungszeitraums und der im Lauf der Jahre zugenommenen Bedeutung des sagittalen Profils. Nach erfolgter Laminektomie wurde am Anfang noch nicht die Mayfield-Klemme zur besseren Re-Lordosierung geöffnet, wodurch ein besseres sagittales Profil erreicht wird. Eine klinische Auswirkung hatte dies nicht.

Eine ausreichende Erweiterung des Spinalkanals wurde mittels MRT ebenfalls in allen Patientenkohorten nachgewiesen. Das Ausmaß der Dekompression zeigte erwartungsgemäß in der 360° Gruppe die größte Effektstärke, war aber auch in den anderen Gruppen durchaus gut.

Interessanterweise zeigte sich, dass das Ausmaß der Dekompression nicht immer mit dem Grad der klinischen Verbesserung korrelierte. Dies bestätigt die Annahme, dass die mechanische Kompression zwar ein wichtiger, aber nur *einer* unter den vielen ursächlichen Faktoren (metabolische, mikro-zirkulatorische und epidemiologische) der DCM ist (Bhattacharyya, 2018).

Die LX mit bilateraler instrumentierter Fusion erzielt eine sehr wirksame Dekompression und minimiert das Risiko einer postoperativen Kyphose. Dieser Sachverhalt wurde auch in der vorliegenden Studie bestätigt. Bemerkenswert ist jedoch, dass dieses Ergebnis auch in der LPUNIL Gruppe erreicht wurde. Durch den einseitigen Zugang wurde das Muskeltrauma verglichen mit der bilateralen Instrumentation allerdings halbiert.

In dieser Studie wurde nicht nur das absolute Ausmaß der Myelondekompression von bis zu 7 mm (LX, Höhe C4/5) analysiert, sondern auch das „wie“ der Entlastung. Ein moderater dorsaler „shift“ des Myelons ist ein guter Indikator für eine „kontrolliertere“ Entlastung. Dieses zeigte sich in allen MRT-Messungen der LPL zunächst als „geringeres“ Ausmaß der Dekompression, führte aber bei allen Patienten zu einer „moderateren“ dorsalen Verlagerung

des Rückenmarkes als in der LX Gruppe. In der Literatur gibt es zahlreiche Hinweise dafür, dass ein zu deutlicher dorsaler shift des Myelons durch ausgeprägte Zugwirkung auf die kürzeste zervikale Wurzel C5 zu einer postoperativen Deltoideus-Parese führen kann (Krätzig et al., 2017; Nassr et al., 1976).

Liu et al. beschreiben 2013 einen unilateralen operativen Zugang für die Dekompression bei OPPL. Vorteile sind die Wirksamkeit einer dorsalen Instrumentation mit geringem Muskeltrauma für den Erhalt der zervikalen Lordose und das reduzierte Risiko einer postoperativen C5 Parese infolge der „abgefederten“ Dekompression des Myelons. In 146 Patienten trat keine C5 Parese auf und die präoperative zervikale Lordose blieb postoperativ unverändert.

In der vorliegenden Studie bestätigte sich dies nicht so deutlich: es traten in der LPL Gruppe zwei (2,1%), in der 360° Gruppe eine (1%) und in der LX Gruppe drei (3,1%) post-operative C5 Paresen auf. Aufgrund eines epiduralen Hämatoms war bei einem Patienten eine Revision mit Hämatomausräumung notwendig. In der LPUNIL Gruppe zeigte sich keine C5 Parese. Erfreulicherweise konnten wir in den postoperativen Nachuntersuchungen bei allen sechs Patienten eine vollständige Rückbildung der C5-Paresen verzeichnen.

Die geringe Anzahl der Patienten pro Gruppe lässt daraus einen Trend bezüglich der „kontrollierteren“ Dekompression erkennen, aber keine Schlussfolgerung ziehen.

Die sonstigen Komplikationen zeigten keinen Zusammenhang mit der gewählten Operationstechnik. Es ist bekannt, dass es bei dem dorsalen zervikalen Zugangsweg aufgrund des Ablösens der Muskulatur mit resultierender größerer Wundfläche als bei dem ventralen zu einer Wundheilungsstörung und/ oder Infekten kommt. Daher achten wir sowohl auf eine streng mediale Präparation in der sog. „avaskulären Zone“ sowohl bei der bi- als auch unilateralen Präparation. Weiterer Vorteil: der Blutverlust wird reduziert. Erfreulicherweise kam es nur bei 4 Patienten zu einer Wundheilungsstörung, was deutlich unter der in der Literatur mit 10% angegebenen Rate liegt (Kothe et al., 2019).

Insgesamt ergab sich eine Komplikationsrate von 14,9%. Dabei wurden sowohl OP-abhängige (C5 Parese) als auch OP-unabhängige Komplikationen (Harnwegsinfekt) erfasst.

Auf die vier Gruppen entfielen:

- LPL: 13,6%
- LPUNIL: 4,5%
- LX: 14,3%
- 360°: 27,3%.

Auch wenn es sich um eine geringe Anzahl von Patienten handelt, bestätigt sich der Trend, dass die aufwendigeren (360°, LX) OP-Techniken auch ein höheres Risiko für Komplikationen bieten. Hierbei ist die Kombination aus längerer OP-Dauer, größerem Weichteiltrauma und ausgeprägterem Myelonshift zu sehen.

Im Hinblick auf die steigende Anzahl der Patienten mit behandlungsbedürftiger DCM sind, neben den klinischen, auch sozialwirtschaftliche Faktoren wie die Kosteneffizienz der Behandlung von Bedeutung.

Goh et al. zeigten, dass die LPL, bei vergleichbar klinischem Ergebnis mit aufwendigeren Verfahren, aufgrund der kürzeren Operationsdauer, der geringeren Implantatkosten und des kürzeren stationären Aufenthaltes „günstiger“ ist (Goh et al., 2020).

Es ist bekannt, dass die Kosten einer Behandlung von dem geltenden Regelwerk des jeweiligen Gesundheitssystems beeinflusst werden. Die Zahlen der Behandlungskosten dieser Studie bestätigen die Ergebnisse von Goh et al.

Auch in unserer Studie unterschieden sich die Gesamtkosten (bestehend aus Implantatkosten, Kosten für die Operationsdauer sowie den stationären Aufenthalt) der vier Operationstechniken deutlich.

Die „kürzere“ und weniger traumatisierende Laminoplastie beinhaltet auch geringere Implantatkosten. Am deutlichsten wurde dies im Vergleich zu der 360°-Versorgung mit mehr als doppelt so hohen Eingriffs-Kosten. Die stationäre Verweildauer ist dabei noch nicht berücksichtigt. Bedenkt man jedoch, dass der stationäre Aufenthalt nach einer LPL bzw. LPUNIL durchschnittlich 8 Tage betrug und nach einer 360°-Versorgung 11-12 Tage, kann der Unterschied nur zunehmen (Abb.66).

Eine Schwäche der vorliegenden Studie ist die geringe Fallzahl der Patienten pro Gruppe. Wichtige klinische Schlussfolgerungen wie die fehlende Korrelation zwischen bildgebendem Ausmaß der Dekompression und postoperativem Benefit für die Patienten oder die klinisch vergleichbare Wirksamkeit zwischen LX mit bilateraler und LPUNIL mit einseitiger Instrumentation werden dadurch jedoch nicht relativiert. Die möglicherweise unterschiedliche Prävalenz der postoperativen C5 Parese in der LPL Gruppe im Vergleich zu dem LX-Kollektiv hingegen schon.

Ein weiterer Aspekt ist die kurze Nachbeobachtungszeit: die abschließende Bewertung der biomechanischen Wirksamkeit der unilateralen Instrumentation in der LPUNIL bedarf mindestens einer zweijährigen postoperativen Verlaufsbeobachtung. Diese wird bereits durchgeführt.

Die zusammenfassende Schlussfolgerung dieser Studie ist, dass nicht *die* einzig „richtige“ OP-Technik das beste klinische Ergebnis erzielt, sondern, dass einzig die „richtige“ OP-Technik für den einzelnen Patienten, das beste klinische Ergebnis erzielt.

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden bei 94 Patienten mit DCM die klinischen und radiologischen Ergebnisse nach Behandlung mit vier verschiedenen OP-Techniken (LPL, LPUNIL, LX, 360°) vergleichend analysiert.

Eingeschlossen wurden Patienten mit einer multisegmentalen degenerativen zervikalen Myelopathie. Ausgeschlossen wurden Patienten mit Revisionseingriff, einer Beteiligung des kranio-zervikalen oder zerviko-thorakalen Überganges oder mit einer rheumatoiden Arthritis. Die Mindestnachbeobachtungszeit betrug 12 Monate, im Mittel 21 Monate. Die Wahl des Operationszuganges wurde anhand eines diagnostischen Algorithmus (CSM-7-Letter-Code) getroffen, der in unserer Abteilung vor 6 Jahren entwickelt wurde.

Die klinischen Daten beinhalteten operative Parameter, Dauer des stationären Aufenthaltes und die Erfassung von Komplikationen. Die Auswertung erfolgte präoperativ und anlässlich der letzten Nachuntersuchung, aber mindestens 1 Jahr postoperativ.

Die Beurteilung der neurologischen Beeinträchtigung erfolgte anhand eines Myelopathie-Scores (EMS). Anhand standardisierter Fragebögen wurden folgende patientenbezogene Outcome-Parameter erhoben: EQ-5D, NDI, VAS Neck, VAS Arm. Die Erfassung der Daten wurde im klinikeigenen Register prospektiv durchgeführt.

Das Ausmaß der Dekompression des Rückenmarkes wurde bei 79 Patienten mit einem postoperativen MRT der HWS untersucht. Gemessen wurde der sagittale Durchmesser des Spinalkanales in der T2 Gewichtung in Höhe der subaxialen Bandscheibenfächer. Die Messungen erfolgten durch zwei unabhängige Untersucher. Das MRT wurde mindestens 1 Jahr postoperativ durchgeführt, um unmittelbare postoperative Artefakte auszuschließen.

Die postoperative Beurteilung des sagittalen Profils und der Beweglichkeit der HWS erfolgte anhand von Röntgenbildern (präoperativ, postoperativ und Follow-Up nach mindestens 1 Jahr) bei 92. Die 560 Röntgenbilder wurden durch eine spezielle Software (FXA-Methode = Functional X-ray Analysis) elektronisch vermessen und ausgewertet.

Die vier Patientengruppen waren vergleichbar bezüglich Alter und Komorbiditäten. Im Median zeigte sich bei der LPL Gruppe (118 min.) eine kürzere OP-Dauer als bei der 360° Gruppe (134 min.).

Die klinischen und radiologischen Ergebnisse der vier OP-Techniken waren vergleichbar. Das sagittale Profil verschlechterte sich in keiner der Gruppen relevant. Trotz einer vermeintlich „besseren“ Dekompression nach 360°-Versorgung, anhand des postoperativen sagittalen Durchmessers im MRT, zeigte die LPL ein klinisch vergleichbar günstiges Ergebnis bei geringerem Muskeltrauma, kürzerer stationärer Verweil- und OP-Dauer und geringeren Operationskosten. Die ebenfalls wenig invasive LPUNIL stellt trotz etwas geringerer Fusionsrate bei geeigneter Indikation eine sinnvolle Alternative zur „klassischen“ Laminektomie dar.

Ob sich infolge einer „kontrollierteren“ dorsalen Verlagerung des Rückenmarkes nach LPL und LPUNIL das Risiko einer postoperativen C5 Parese signifikant reduzieren lässt, kann aufgrund der geringen Patientenzahl nur vermutet werden.

Summary

Ninety-four patients, surgical candidates affected by multi-segmental degenerative cervical myelopathy (DCM), were enrolled in a prospective cohort-study. Exclusion criteria were the affection of the cranio-cervical or cervico-thoracic area, revision surgery or rheumatoid arthritis.

Four different operation techniques were compared: 1. laminoplasty via a unilateral approach (LP); 2. laminectomy with bilateral fixation (LX); 3. laminoplasty with unilateral fixation (LPUNIL), and 4. 360° approach.

The clinical and radiological outcome, the complication rate and the treatment costs were assessed. The following clinical parameters were monitored: Myelopathy (European Myelopathy Score, EMS); neck and arm pain (Numeric Analog Scale, NAS), and neck disability (Neck Disability Index, NDI). Numerous radiological parameters of the cervical

alignment were analyzed with a specific software (FXA-method). The minimum follow up was 12 months (mean 21 months).

The four cohorts of patients were similar in demographics and comorbidities.

All the surgical techniques achieved a mean improvement of 3 points in the EMS. Surprisingly, neck pain was not less following a unilateral approach (LP or LPUNIL) than a bilateral one (LX). The sagittal alignment was maintained or restored comparably with the four surgical techniques. At the one-year FU the postoperative MRIs (n= 79) showed that the decompression of the spinal cord was best following the 360° approach but not significantly larger compared with the other techniques.

The complication rate (3-4%) was comparable for all cohorts. Fortunately, all the five C5-palsies (2 LP and 3 LX) were transient.

As expected, the 360° surgery had the longest OR-Time (134 min vs. mean 118), the longest stay, and the highest costs (twice as high as LP).

The LPUNIL technique represents an effective and safe alternative with less surgical trauma, shorter operation time and length of stay, whenever decompression and fixation are required.

The LPL via a unilateral approach shows the best cost-benefit ratio.

8. Literaturverzeichnis

- Albert** TJ, Vaccaro A (1998) Postlaminectomy kyphosis. *Spine* 23:2738–2745.
- Bartels** RH, van Tulder MW, Moojen WA, Arts MP, & Peul WC (2015) Laminoplasty and laminectomy for cervical spondylotic myelopathy: a systematic review. *Eur Spine J* 24 (Suppl 2): 160–167.
- Beattie** MS, Manley GT (2011) Tight Squeeze, slow burn: inflammation and the etiology of cervical myelopathy. *Brain* 134: 1259-1263.
- Benzel** EC (1996) Cervical spondylotic myelopathy. Posterior surgical approaches. In: Menezes AH, Sonntag VKH: *Principles of Spinal Surgery*. McGraw-Hill, New York.
- Benzel** EC, Lancon J, Kesterson L, Hadden T (1991) Cervical laminectomy and dentate ligament section for cervical spondylotic myelopathy. *J Spinal Disord*;4(3): 286-295.
- Bhattacharyya** S (2018) Spinal Cord Disorders: Myelopathy. *Am J Med.*;131(11):1293-1297.
- Börm** W, Meyer F (2009) *Spinale Neurochirurgie. Operatives Management von Wirbelsäulenerkrankungen*, 1. Auflage, Schattauer Verlag, Stuttgart.
- Carol** MP, Ducker TB (1988) Cervical spondylotic myelopathies: surgical treatment. *J Spinal Disord.*;1(1):59-65.
- Chen** CJ, Lyu RK, Lee ST, Wong YC, Wang LJ (2001) Intramedullary high signal intensity on T2-weighted MR images in cervical spondylotic myelopathy: prediction of prognosis with type of intensity. *Radiology* 22: 7890-7894.
- Cho** CB, Chough CK, Oh JY, Park HK, Lee KJ, Rha HK (2010) Axial neck pain after cervical laminoplasty. *J Korean Neurosurg* 47: 107-111.
- Chung** SS, Lee CS, Chung KH (2002) Factors affecting the surgical results of expansive laminoplasty for cervical spondylotic myelopathy. *Int Orthop* 26: 334-338.
- Clarke** E, Robinson PK (1956) Cervical myelopathy. A complication of cervical spondylosis. *Brain* 79: 483-485.

Epstein JA, Epstein BS, Lavine LS (1963) Cervical spondylotic myelopathy: The syndrome of the narrow canal treated by laminectomy, foraminotomy and the removal of osteophytes. *Arch Neurol* 8: 307-317.

Epstein JA, Carras R, Hyman RA, Costa S (1979) Cervical myelopathy caused by developmental stenosis of the spinal canal. *J Neurosurg* 51: 362-367.

Epstein NE, Danto J, Nardi D (1993) Evaluation of intraoperative somatosensory-evoked potential monitoring during 100 cervical operations. *Spine* 18: 737-747.

Guan X, Fan G, Wu X, Gu G, Gu X, Zhang H, He S (2015) Diffusion tensor imaging studies of cervical spondylotic myelopathy: a systemic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2015;10(2): e0117707. Published 2015 Feb 11. doi:10.1371/journal.pone.0117707 (abgerufen am 14.01.2021)

Fehlings MG, Wilson JR, Kopjar B et al. (2013) Efficacy and safety of surgical decompression in patients with cervical spondylotic myelopathy: results of the AOSpine North America prospective multi-center study. *J Bone Joint Surg Am*; 95: 1651–1658.

Fehlings MG, Ibrahim A, Tetreault L et al. (2015) A global perspective on the outcomes of surgical decompression in patients with cervical spondylotic myelopathy: results from the prospective multicenter AOSpine International study on 479 patients. *Spine* 40: 1322–1328.

Goh BC, Striano BM, Lopez WY, Upadhyaya S, Ziino C, Georgakas PJ, Tobert DG, Fogel HA, Cha TD, Schwab JH, Bono CM, Hershman SH (2020) Laminoplasty versus laminectomy and fusion for cervical spondylotic myelopathy: a cost analysis. *Spine J*. 20(11):1770-1775.

Handy Y, Kubota T, Ishii H (2002) Evaluation of prognostic factors and clinical outcome in elderly patients in whom expansive laminoplasty is performed for cervical myelopathy due to multisegmental spondylotic canal stenosis: A retrospective comparison with younger patients. *J Neurosurg* 96: 173-179.

Hayashi H, Okada K, Hamada M, Tada K, Ueno R (1987) Etiologic factors of myelopathy. A radiographic evaluation of the aging changes in the cervical spine. *Clin Orthop Relat Res* 214: 200-209.

- Hidai** Y, Ebara S, Kamimura M, Tateiwa Y, Itoh H, Kinoshita T (1999) Treatment of cervical compressive myelopathy with a new dorsolateral decompressive procedure. *J Neurosurg* 90: 178-185.
- Hosono** N, Sakaura H, Mukai Y (2006) C3-6 laminoplasty takes over C3-7 laminoplasty with significantly lower incidence of axial neck pain. *Eur Spine J* 15: 1375-1379.
- Hosono** N, Yonenobu K, Ono K (1996) Neck and shoulder pain after laminoplasty: a noticeable complication. *Spine* 21: 1969-1973.
- Iizuka** H, Shimizu T, Tateno K, Toda N, Edakuni H, Shimada H (2001) Extensor musculature of the cervical spine after laminoplasty: morphologic evaluation by coronal view of the magnetic resonance image. *Spine* 26: 2220-2226.
- Kalsi-Ryan** S, Karadimas S, Fehlings M (2013) Cervical spondylotic myelopathy: the clinical phenomenon and the current patho-biology of an increasingly prevalent and devastating disorder. *Neuroscientist* 19: 409–421.
- Kaminsky** SB, Clark CR, Traynelis VC (2004) Operative treatment of cervical spondylotic myelopathy and radiculopathy. A comparison of laminectomy and laminoplasty at five-year average follow-up. *Iowa Orthop J.* 24: 95-105.
- Kang** Y, Lee JW, Koh YH, Hur S, Kim SJ, Chai JW, Kang HS (2011) New MRI grading system for the cervical canal stenosis. *AJR Am J Roentgenol.* 197(1): W134-40.
- Kato** S, Fehlings M (2016) Degenerative cervical myelopathy. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 9(3): 263-71.
- Kato** M, Namikawa T, Matsumura A, et al. (2017) Effect of cervical sagittal balance on laminoplasty in patients with cervical myelopathy. *Glob Spine J* 7:154–161.
- Keirstead** HS, Blakemore WF (1999): The role of oligodendrocytes and oligodendrocyte progenitors in CNS remyelination. *Adv Exp Med Biol* 468: 183-197.
- Kim** YT, Lee CS, Lee SW, Choi DS, Lee SW (2005): Prognostic factors affecting the results of the surgery for cervical spondylotic myelopathy. *J Korean Soc Spine Surg* 12: 255-261.

Kothe R (2019) Zervikale Myelopathie. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date 14: 591–608.

Kunze K, Arlt A, Müller E (1991) Klinik der zervikalen Myelopathien. In: Delenk HW, Schmitt E: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis. Zervikale Myelopathien. Band 113. Hippokrates Verlag, Stuttgart.

Krätzig T., Mohme, M., Mende, K. C., Eicker, S. O., & Floeth, F. W. (2017) Impact of the surgical strategy on the incidence of C5 nerve root palsy in decompressive cervical surgery. Online: *PloS one* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188338> (abgerufen am 14.01.2021).

Lang J (1991) Klinische Anatomie der Halswirbelsäule. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Lee C-H, Lee J, Kang JD et al (2015) Laminoplasty versus laminectomy and fusion for multilevel cervical myelopathy: a meta-analysis of clinical and radiological outcomes. *J Neurosurg Spine* 22: 589–595.

Lestini WF, Wiesel SW (1989) The pathogenesis of cervical spondylosis. *Clin Orthop Relat Res* 239: 69-93.

Liu K, Shi J, Jia L, Yuan W (2013) Surgical Technique: Hemilaminectomy and Unilateral Lateral Mass Fixation for Cervical Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament. *Clin Orthop Relat Res.* 471(7): 2219-24

Ludolph A.C. et al. (2017) S1 Leitlinie Zervikale spondylotische Myelopathie. In: Deutsche Gesellschaft für Neurologie, Hrsg. Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie. Online: www.dgn.org/leitlinien (abgerufen am 06.12.2020)

Machino M, Yukawa Y, Imagama S, Ito K, Katayama Y, Matsumoto T, Inoue T, Ouchida J, Tomita K, Ishiguro N, Kato F (2016) Surgical Treatment Assessment of Cervical Laminoplasty Using Quantitative Performance Evaluation in Elderly Patients: A prospective comparative study in 505 patients with cervical spondylotic myelopathy. *Spine* 41(9):757-63.

McCormick PC, Torres R, Post KD, Stein BM (1990) Intramedullary ependymoma of the spinal cord. *J Neurosurg* 72: 523-532.

Milligan J, Ryan K, Fehlings M, Bauman C (2019) Degenerative cervical myelopathy: Diagnosis and management in primary care. *Can Fam Physician*. 65(9):619-624.

Nassr A, Eck JC, Ponnapan RK, Zanoun RR et al. (2012) The incidence of C5 palsy after multilevel cervical decompression procedures: a review of 750 consecutive cases. *Spine* 37: 174–178.

Nowinski GP, Visarius H, Nolte LP, Herkowitz HN (1993) A biomechanical comparison of cervical laminoplasty and cervical laminectomy with progressive facetectomy. *Spine* 18: 1995–2004.

Pal GP, Rotal RV (1996) The role of the vertebral laminae in the stability of the cervical spine. *J Anat* 188: 485-489.

Papavero L, Schmeiser G, Kothe R, Boszczyk B, Heese O, Kawaguchi Y, MacDowall A, Olerud C, Paidakakos N, Panagiotou A, Pitzen T, Richter M, Riew KD, Stevenson A, Tan L, Ueshima R, Yau YH, Mayer M (2020) Degenerative Cervical Myelopathy: A 7-Letter Coding System That Supports Decision-Making for the Surgical Approach. *Neurospine* 17(1):164-171.

Payer M, Schaller K (2009): Degenerative Halswirbelsäulenschäden. *Schweizerische Gesellschaft für Neurochirurgie* 1: 1-4.

Phan K, Scherman DB, Xu J, et al. (2017) Laminectomy and fusion vs laminoplasty for multi-level cervical myelopathy: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J* 26: 94–103.

Rampersaud Y. R., Anderson, P. A., Dimar, J. R., 2nd, Fisher, C. G., & Spine Trauma Study Group and Degenerative Spine Study Group (2016). Spinal Adverse Events Severity System, version 2 (SAVES-V2): inter- and intraobserver reliability assessment. *Journal of neurosurgery*. *Spine*, 25(2): 256–263.

- Roselli R**, Pompucci A, Formica F, et al. (2000) Open-door laminoplasty for cervical stenotic myelopathy: surgical technique and neurophysiological monitoring. *J Neurosurg* 92: 38–43.
- Rowland LP** (1992) Surgical treatment of cervical spondylotic myelopathy: time for a controlled trial. *Neurology* 42: 5-13.
- Schmeiser G**, Schilling C, Grupp TM, Papavero L, Püschel K, Kothe R (2015) Unilateral laminoplasty with lateral mass screw fixation for less invasive decompression of the cervical spine: a biomechanical investigation. *Eur Spine J.* 24 (12): 2781-7.
- Schöller K.**, Siller, S., Brem, C., Lutz, J., & Zausinger, S. (2020). Diffusion Tensor Imaging for Surgical Planning in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of neurological surgery. Part A, Central European neurosurgery*, 81(1): 1–9.
- Schulze M.**, Trautwein F., Vordemvenne T., Raschke M., Heuer F (2011) A method to perform spinal motion analysis from functional X-ray images. *J Biomech.* 44(9):1740-6.
- Suri A**, Chhabra RP, Mehta VS, Gaikwad S, Pandey RM (2003) Effect of intramedullary signal changes on the surgical outcome of patients with cervical spondylotic myelopathy. *Spine* 3: 33-45.
- Tetreault L**, Goldstein CL, Arnold P, Harrop J, Hilibrand A, Nouri A, Fehlings MG (2015) Degenerative Cervical Myelopathy: A spectrum of related disorders affecting the aging spine. *Neurosurgery* 77 (Suppl 4): 51-67.
- Tschugg A**, Meyer B, Stoffel M. et al. (2018) Operative Versorgung der degenerativen Halswirbelsäule. *Nervenarzt* 89: 632–638.
- Verbiest H** (1973) The management of cervical spondylosis. *Clin Neurosurg* 20: 262-294.
- Verbiest H**, Paz Y, Geuse HD (1966) Anterolateral Surgery for Cervical Spondylosis in Cases of Myelopathy or Nerve-Root Compression. *J Neurosurg* 25: 611-622.
- Vernon H.**, Mior, S. (1991). The Neck Disability Index: A study of reliability and validity. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 14: 409-415.
- Voskuhl RR**, Hinton RC (1990) Sensory impairment in the hands secondary to spondylotic compression of the cervical spinal cord. *Arch Neurol* 47: 309-311.

Wang X-Y, Dai L-Y, Xu H-Z, Chi Y-L (2006) Prediction of spinal canal expansion following cervical laminoplasty: a computer-simulated comparison between single and double-door techniques. *Spine* 31: 2863–2870.

Wilson JR, Tetreault LA, Kim J, et al. (2017) State of the Art in Degenerative Cervical Myelopathy: An Update on Current Clinical Evidence. *Neurosurgery* 80: S33- S45.

White AA 3rd, Panjabi MM (1988) Biomechanical considerations in the surgical management of cervical spondylotic myelopathy. *Spine* 13: 856-860.

Yang L, Gu Y, Shi J, et al (2013) Modified plate-only open-door laminoplasty versus laminectomy and fusion for the treatment of cervical stenotic myelopathy. *Orthopedics* 36: 79-87.

Young I. A., Cleland, J. A., Michener, L. A., & Brown, C. (2010). Reliability, construct validity, and responsiveness of the neck disability index, patient-specific functional scale, and numeric pain rating scale in patients with cervical radiculopathy. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 89(10): 831–839.

Yoshida M, Tamaki T, Kawakami M, Nakatani N, Ando M, Yamada H (2002) Does reconstruction of posterior ligamentous complex with extensor musculature decrease axial symptoms after cervical laminoplasty? *Spine* 27: 1414-1418.

9. Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: NETTER FRANK H: FARBATLANTEN DER MEDIZIN – BD. 7. BEWEGUNGSAPPARAT I. THIEME: STUTTGART NEW YORK, S. 9-13 (1992)	11
ABB. 2: KLASSIFIKATION DER ZERVIKALEN STENOSE (KANG ET AL., AJR, 2011).....	15
ABB. 3: „COBRA SIGN“. VENTRO-DORSALE DEKOMPRESSION UND FUSION C3/ C4 A) MRT PRÄOPERATIV SAGITTAL UND AXIAL. B) MRT 1 JAHR POSTOPERATIV SAGITTAL UND AXIAL. (KOTHE ET AL., ORTHOPÄDIE UND UNFALLCHIRURGIE Up2DATE, 2019)	16
ABB. 4: KLINISCHER FALL: (LINKS) IM MRT WURDE EIN BSV C5/C6 ALS URSACHE DER MYELOPATHIE VERMUTET. AUF EINE ZUSÄTZLICHE PRÄOPERATIVE CT WURDE VERZICHTET. (MITTE): DAS BANDSCHEIBENFACH WURDE AUSGERÄUMT UND EIN TITAN-CAGE EINGEBRACHT. (RECHTS): INFOLGE DER PERSISTENZ DER SYMPTOMATIK WURDE POSTOPERATIV EINE CT DURCHFÜHRT, DIE EINE VOLLSTÄNDIGE VERKALKUNG DES BSV NACHWIES.	17
ABB. 5: SAGITTALES T2-GEWICHTETES HWS-MRT UND CT PRÄOPERATIV	18
ABB. 6: AXIAL T2 GEWICHTETES MRT UND CT DER SEGMENTE C3/4, C4/5, C5/6 UND C6/7 EINES 57-JÄHRIGEN PATIENTEN MIT ZERVIKALER STENOSE C4/5	19
ABB. 7: AXIALES DTI DER SEGMENTE C3/4, C4/5, C5/6 UND C6/7 INTERESSANTERWEISE SIEHT MAN TROTZ IM MRT MODERATER/ GERINGER STENOSE (C3-4; C6-7) IM DTI BEREITS EINE DEUTLICHE SIGNALANHEBUNG.	19
ABB. 8: PARAMETER FÜR SAGITTALE BALANCE	24
ABB. 9: DER EUROPÄISCHE MYELOPATHIE SCORE	26
ABB. 10: FORMEL ZUR BERECHNUNG DER RECOVERY RATE.....	27
ABB. 11: BERECHNUNG DES NECK-DISABILITY-INDEX (NDI)	28
ABB. 12: FRAGEBOGEN EQ-5D	29
ABB. 13: DIE NUMERISCHE ANALOGSKALA	30
ABB. 14: ACDF: TITAN-CAGE IN SITU (PAPAVERO, 2020).....	32
ABB. 15: Z.N. ACDF C6/C7 MIT RÖNTGENTRANSPARENTEM PEEK-CAGE (NEOCIF, BIOMET, BERLIN). DREI KLEINE BARIUMSTIFTE ERMÖGLICHEN DIE RÄUMLICHE ZUORDNUNG DES IMPLANTATES.	33
ABB. 16: Z.N. ACDF C6/C7 MIT RÖNTGEMDICHEM, 3-D DRUCK, TITANCAGE (OYSTER, SILONY, BREMEN). IN DER A.P.-AUFNAHME IST DER CAGE ZWAR ZENTRIERT, ABER DEUTLICH NACH LINKS (ZUGANGSSEITE) GEDREHT.	33
ABB. 17: (LINKS) Z.N. RESEKTION DES WIRBELKÖRPERS. DAS HINTERE LÄNGSBAND IST NOCH IN SITU. (RECHTS) DAS DISTRAHIERBARE IMPLANTAT IST EINGESETZT, ABER NOCH NICHT MIT DEN ANKERSCHRAUBEN FIXIERT. DAS IMPLANTAT UND EINE SEITE DES EPIDURALRAUMES SIND MIT KNOCHENCHIPS GEFÜLLT. DIE ANDERE SEITE ERMÖGLICHT DEN ABFLUSS VON BLUT. (PAPAVERO, 2020)	35
ABB. 18: ACCF HWK4.....	35
ABB. 19: "CONCORDE" LAGERUNG.....	36

ABB. 20: LAMINEKTOMIE C3-6 MIT BILATERALER FUSION (PAPAVERO, 2020)	37
ABB. 21: LAMINOPLASTIE C3-6 ÜBER EINSEITIGEN ZUGANG LINKS. DIE LINKSSEITIGE BILDHÄLFTE IST KRANIAL. (PAPAVERO, 2020)	38
ABB. 22: (LINKS UND MITTE) Z.N. LAMINOPLASTIE C3/C6 ÜBER EINSEITIGEN ZUGANG LINKS. (RECHTS) IN DER AXIALEN CT- SCHICHT IST DIE GRÜNHOLZFRAKTUR KONTRALATERAL ZUR „OPENING SIDE“ GUT ZU ERKENNEN. INTERESSANTERWEISE HAT EINE POSTOPERATIVE CT-SERIENUNTERSUCHUNG GEZEIGT, DASS SICH DER FRAKTURBEREICH NICHT IN DEN SPINALKANAL WÖLBT. (OPERATIVE ORTHOPÄDIE UND TRAUMATOLOGIE, KOTHE 2018)	39
ABB. 23: (LINKS) "KONVENTIONELLER" BILATERALER ZUGANG UND (RECHTS) UNILATERALER ZUGANG.....	40
ABB. 24: (LINKS)VORBOHREN DER LÖCHER FÜR DIE POLYAXIALEN MASSAE LATERALES SCHRAUBEN UND (RECHTS) LAMINOTOMIE C3-C6	40
ABB. 25: (LINKS) AUFBRECHEN DER BÖGEN; (RECHTS) FIXIERUNG UND FUSION UNILATERAL (SCHMEISER, 2019)	41
ABB. 26: Z.N. LAMINOPLASTIE MIT UNILATERALER INSTRUMENTATION ÜBER EINSEITIGEN ZUGANG. BEMERKENSWERT IST DIE ERHALTENE LORDOSE (SCHMEISER, 2019)	41
ABB. 27: RANGE OF MOTION (ROM) C3-6	43
ABB. 28: C2-7 COBB ANGLE	44
ABB. 29: C2-7 HINTERE TANGENTE METHODE.....	44
ABB. 30: C2-7 SVA	44
ABB. 31: LORDOSE C0-C2	45
ABB. 32: C1/2 WINKEL	45
ABB. 33: C7 SLOPE	46
ABB. 34: BOXPLOTS DER PRÄOPERATIVEN EMS-WERTE DER 4 GRUPPEN	49
ABB. 35: BOXPLOTS DER POSTOPERATIVEN EMS-WERTE DER 4 GRUPPEN	50
ABB. 36: BOXPLOT RECOVERY RATE (INKL. 3 AUSREIßER)	51
ABB. 37: BOXPLOT „BEREINIGTE“ RECOVERY RATE OHNE AUSREIßER	52
ABB. 38: NAS ARM MITTELWERTE PRÄ-/ POSTOPERATIV IM VERGLEICH.....	53
ABB. 39: VERGLEICH ZWISCHEN DER PRÄ- UND 12-MONATE POSTOP. NAS ARM WERTE.....	55
ABB. 40: PRÄ- UND POSTOPERATIVE NAS NACKEN MITTELWERTE IM VERGLEICH	57
ABB. 41: NDI MITTELWERTE PRÄ-/ POSTOPERATIV IM VERGLEICH	58
ABB. 42: NDI PRÄ- UND 12 MONATE POSTOPERATIV IM VERGLEICH.....	59
ABB. 43: DARSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN INDEX-SEGMENTE DER 360° GRUPPE	61
ABB. 44: DARSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN INDEX-SEGMENTE DER LX GRUPPE.....	62
ABB. 45: DARSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN INDEX-SEGMENTE DER LPL GRUPPE	63
ABB. 46: DARSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN INDEX-SEGMENTE DER LPUNIL GRUPPE.....	64
ABB. 47: ANZAHL DER OPERIERTEN INDEX-SEGMENTE	65

Abb. 48: C3-6 ROM 360°	66
Abb. 49: C3-6 ROM LX	66
Abb. 50: C3-6 ROM LPL	66
Abb. 51: C3-6 ROM LPUNIL	66
Abb. 52: C27PL DER 360° GRUPPE PRÄ/POST	68
Abb. 53: C27PL DER LX GRUPPE PRÄ/POST.....	68
Abb. 54: C27PL DER LPL GRUPPE PRÄ/POST	68
Abb. 55: C27PL DER LPUNIL GRUPPE PRÄ/ POST	68
Abb. 56: C0-2 PRÄ/POST 360° GRUPPE	69
Abb. 57: C0-2 PRÄ/POST LX GRUPPE	69
Abb. 58: C0-2 PRÄ/POST LPL GRUPPE	70
Abb. 59: C0-2 PRÄ/POST LPUNIL GRUPPE	70
Abb. 60: SVA C2C7 360°	70
Abb. 61: SVA C2C7 LX	70
Abb. 62: SVA C2C7	71
Abb. 63: SVA C2C7 LPUNIL	71
Abb. 64: DURCHMESSER DES SPINALKANALS FÜR JEDES SEGMENT IM PRÄ-/ POSTOP. VERGLEICH.....	73
Abb. 65: WIRKSAMKEIT DER ERWEITERUNG DES SPINALKANALS DURCH DIE VIER OP-TECHNIKEN IM SEGMENTVERGLEICH	74
Abb. 66: C3/4 & C4/5: DEKOMPRESSIONSTECHNIKEN IM VERGLEICH A) PRÄOP. UND B) POSTOP..	75
Abb. 67: C5/6 & C6/7: DEKOMPRESSIONSTECHNIKEN IM VERGLEICH A) PRÄOP. UND B) POSTOP.	76
Abb. 68: BOXPLOT OP-DAUER	78
Abb. 69: BOXPLOT STATIONÄRE VERWEILDAUER IN TAGEN	78

10.Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: STADIEN DER ZERVIKALEN MYELOPATHIE NACH KANG ET AL.....	15
TABELLE 2: KLINISCHE DATEN DES PATIENTENKOLLEKTIVS.....	48
TABELLE 3: RECOVERY RATE	51
TABELLE 4: BEREINIGTE RECOVERY RATE OHNE AUSREIßER	52
TABELLE 5: NAS STATISTIK	54
TABELLE 6: NAS NECK	56
TABELLE 7: ROM C3-6 PRÄ/POST UND FUSIONS RATEN DER 4 GRUPPEN	67
TABELLE 8: VERGLEICH DES PRÄ- UND POSTOPERATIVEN DURCHMESSERS DES SPINALKANALS IM MRT	72
TABELLE 9: OP-DAUER DER VIER OPERATIONSTECHNIKEN	77
TABELLE 10: IMPLANTATKOSTEN	79
TABELLE 11: ORIENTIERENDE GESAMTKOSTEN DER VIER OPERATIONSTECHNIKEN	80

11. Danksagung

Ich danke Herrn PD Dr. med. Ralph Kothe und Herrn Dr. med. Gregor Schmeiser für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas sowie die Unterstützung, diese Arbeit in der Klinik für Spinale Chirurgie durchführen zu können.

Unterstützt wurde diese Arbeit durch die Deutsche Arthrose-Hilfe (Project-Code: P260-A609-Papavero-EP1-wirbelsäule-op-1-114k-2012-17), der dafür ebenfalls mein Dank gilt.

Ein großes „Danke schön!“ auch Herrn Dr. med. Ben Stanczus für seinen Fleiß und die Mitarbeit im Rahmen der MRT-Auswertung.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr. med. Christina Gibbert sowie Herrn Rainer Gibbert für das jederzeit offene Ohr, die stetige Ermutigung und letztlich auch tatkräftige Unterstützung bei jeglichen Computer-Fallstricken.

„Molte grazie“ Herrn Prof. Dr. med. Luca Papavero: Seine hervorragende Beratung, Betreuung, die fachliche und vor allem auch menschliche Unterstützung, Ermutigung und Mitarbeit haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke für das Verständnis und die Geduld!

Mein persönlicher Dank gilt nun zuletzt und ganz besonders meiner Tochter Leni, die mir so häufig trotz ihres jungen Alters mit Geduld und Nachsicht die Zeit gegeben hat, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

12. Lebenslauf

-wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt-

13. Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe und die aus den benutzten Werken wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: