

Aus der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik  
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. Jörg-Christian Tonn

***Bilaterale dorsale Dekompression des Rückenmarks nach unilateraler  
Eröffnung des Spinalkanals als Alternative zur Laminektomie bei  
zervikaler und thorakaler spondylotischer Myelopathie***

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Laura Maria Edith Pannenbäcker

aus

München

2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Stefan Zausinger

Mitberichterstatter: PD. Dr. med. Manfred Pfahler  
Prof. Dr. med. Sandro Krieg

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: PD Dr. med. Sebastian Siller

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2021

*Meiner Familie*

## Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>4</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>6</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>7</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>8</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Anatomie der Hals- und Brustwirbelsäule.....</i>	9
1.2 <i>Definition und Epidemiologie.....</i>	13
1.3 <i>Ätiologie und Pathologie.....</i>	14
1.3.1 <i>Ätiologie der zervikalen und thorakalen spondylotischen Myelopathie.....</i>	14
1.3.2 <i>Pathologie der zervikalen und thorakalen spondylotischen Myelopathie.....</i>	15
1.4 <i>Klinik und Diagnostik.....</i>	16
1.4.1 <i>Symptomatik.....</i>	16
1.4.2 <i>Klinische Untersuchung.....</i>	17
1.4.3 <i>Bildgebende Diagnostik.....</i>	18
1.5 <i>Therapie .....</i>	19
1.5.1 <i>Nicht operative Therapie .....</i>	19
1.5.2 <i>Operative Therapie .....</i>	20
<b>2 FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>23</b>
<b>3 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Patientengut .....</i>	24
3.2 <i>Studienablauf.....</i>	26
3.3 <i>Erläuterung der klinischen Scores .....</i>	27
3.4 <i>Radiologische Diagnostik .....</i>	29
3.5 <i>Indikationen und Operationen .....</i>	30
3.6 <i>Statistische Methoden .....</i>	32
<b>4 ERGEBNISSE .....</b>	<b>33</b>
4.1 <i>Beurteilung des Patientenkollektivs ZSM.....</i>	33
4.1.1 <i>Demographische Ergebnisse .....</i>	33
4.1.2 <i>Radiologische Ergebnisse .....</i>	35
4.1.3 <i>Chirurgische Ergebnisse .....</i>	37
4.1.4 <i>OP-Erfolg und Langzeitergebnisse .....</i>	38
4.1.5 <i>Beurteilung von Risikofaktoren.....</i>	41
4.2 <i>Ergebnisse des Patientenkollektivs TSS.....</i>	42
4.2.1 <i>Demographische Ergebnisse .....</i>	42
4.2.2 <i>Radiologische Ergebnisse .....</i>	44
4.2.3 <i>Chirurgische Ergebnisse .....</i>	47
4.2.4 <i>OP-Erfolg und Langzeitergebnisse .....</i>	47
4.2.5 <i>Beurteilung von Risikofaktoren.....</i>	49

Inhaltsverzeichnis	5
5 DISKUSSION .....	50
5.1 Diskussion der Ergebnisse der ZSM-Patienten Fallserie .....	50
5.1.1 Limitationen .....	55
5.2 Diskussion der Ergebnisse der TSS-Patienten-Fallserie .....	55
5.2.1 Limitationen .....	58
6 ZUSAMMENFASSUNG .....	59
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>59</b>
<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>67</b>
<b>AFFIDAVIT .....</b>	<b>68</b>
<b>VERÖFFENTLICHUNG VON TEILERGEBNISSEN DIESER ARBEIT.....</b>	<b>69</b>

---

**Abbildungsverzeichnis**

ABBILDUNG 1: AUFBAU DER WIRBELSÄULE.....	9
ABBILDUNG 2: AUFBAU EINES HALSWIRBELS.....	10
ABBILDUNG 3: AUFBAU EINES BRUSTWIRBELS.....	11
ABBILDUNG 4: BÄNDER DER WIRBELSÄULE.....	12
ABBILDUNG 5: PRÄOPERATIVE MRT-AUFNAHMEN.....	25
ABBILDUNG 6: HÖHE DER STENOSE UND GEWÄHLTES OPERATIVES VERFAHREN.....	36
ABBILDUNG 8: HÖHE DER STENOSE UND GEWÄHLTES OPERATIVES VERFAHREN.....	44
ABBILDUNG 9: MRT AUFNAHMEN VOR UND NACH DEKOMPRESSION.....	46

---

**Tabellenverzeichnis**

TABELLE 1: ALTER UND GESCHLECHT DER ZSM-PATIENTEN .....	33
TABELLE 2: SYMPTOMDAUER UND PRÄOPERATIVE SYMPTOMATIK DER ZSM-PATIENTEN .....	34
TABELLE 3: BEGLEITERKRANKUNGEN DER ZSM-PATIENTEN.....	35
TABELLE 4: EIGENSCHAFTEN DER STENOSEN BEI DEN ZSM-PATIENTEN.....	36
TABELLE 5: OP-DATEN UND KOMPLIKATIONEN DER ZSM-PATIENTEN .....	38
TABELLE 6: KLINISCHE LANGZEITERGEBNISSE NACH NACHSORGEUNTERSUCHUNG BEI ZSM-PATIENTEN MIT UNILATERALEM OP-ZUGANG .....	40
TABELLE 7: KLINISCHE LANGZEITERGEBNISSE NACH NACHSORGEUNTERSUCHUNG BEI ZSM-PATIENTEN MIT BILATERALEM OP- ZUGANG.....	41
TABELLE 8: ALTER UND GESCHLECHT DER TSS-PATIENTEN.....	42
TABELLE 9: SYMPTOMDAUER UND PRÄOPERATIVE SYMPTOMATIK DER TSS-PATIENTEN .....	43
TABELLE 10: BEGLEITERKRANKUNGEN DER TSS-PATIENTEN .....	44
TABELLE 11: PATHOLOGIE DER STENOSE BEI TSS-PATIENTEN .....	45
TABELLE 12: OP-DATEN UND KOMPLIKATIONEN BEI TSS-PATIENTEN .....	47
TABELLE 13: KLINISCHE LANGZEITERGEBNISSE NACH NACHSORGEUNTERSUCHUNG BEI TSS-PATIENTEN .....	49

---

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>ACDF</b> <i>Anterior Discectomy and fusion</i>	<b>MCS</b> <i>mental component score (Engl. Score für psychisches Wohlbefinden)</i>
<b>ACF</b> <i>Anterior corpectomy and fusion</i>	<b>min</b> <i>Minuten</i>
<b>aHT</b> <i>Arterielle Hypertonie</i>	<b>ml</b> <i>Milliliter</i>
<b>Altgr.</b> <i>Altgriechisch</i>	<b>MRT</b> <i>Magnetresonanztomographie</i>
<b>AP</b> <i>Anterior- Posterior</i>	
	<b>n</b> <i>Größe der Stichprobe</i>
<b>BMI</b> <i>Body-Mass-Index</i>	
<b>BWS</b> <i>Brustwirbelsäule</i>	
	<b>OLF</b> <i>Ossification of the ligamentum flavum (Engl. für Ossifikation des Ligamentum flavum)</i>
<b>C</b> <i>Halswirbelkörper</i>	<b>OP</b> <i>Operation</i>
<b>CT</b> <i>Computertomographie</i>	<b>OPLL</b> <i>Ossification of the posterior longitudinal ligament (Engl. für Ossifikation des hinteres Längsbandes)</i>
<b>EILF</b> <i>Erweiterte intralaminäre Fensterung, Erweiterte intralaminäre Fensterung</i>	
	<b>pAVK</b> <i>Periphere Arterielle Verschlusskrankheit</i>
<b>FU</b> <i>Follow-up (Engl. für Nachsorgeuntersuchung)</i>	<b>PCS</b> <i>physical component score (Engl. für Score für physisches Wohlbefinden)</i>
<b>HWS</b> <i>Halswirbelsäule</i>	<b>Th</b> <i>Thorax (lat. für Pars thoracica)</i>
<b>KHK</b> <i>Koronare Herzkrankheit</i>	<b>UCT</b> <i>Undercutting, Undercutting</i>
<b>LWS</b> <i>Lendenwirbelsäule</i>	<b>VAS</b> <i>Visuelle Analog Skala</i>
<b>MCID</b> <i>minimally clinically important difference (Engl. für Minimal wichtiger Unterschied)</i>	<b>ZSM</b> <i>Zervikale spondylotische Myelopathie</i>



## 1 Einleitung

### 1.1 Anatomie der Hals- und Brustwirbelsäule

#### Allgemeiner Aufbau

Die Wirbelsäule bildet den zentralen Bestandteil des Achsenskeletts im menschlichen Körper. Sie besteht aus mehreren Abschnitten: der Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule, sowie dem Kreuz- und Steißbein. Sie besteht aus 32-34 Wirbeln, den dazugehörigen Bandscheiben und verschiedenen Bändern. Ein Wirbel ist aus einem Wirbelkörper und einem Wirbelbogen mit seinen Fortsätzen zusammengesetzt. Die ersten 24 Wirbel (von C1-L5) sind nicht fest miteinander verbunden, sondern werden über zahlreiche Bänder zusammengehalten. Die spezielle Anatomie der Wirbel ist in jedem Abschnitt verschieden und entscheidet über die Beweglichkeit dieses Abschnitts.

Die Form der Wirbelsäule wird durch ihre Doppel-S-Form durch zwei aufeinander folgende Krümmungen bestimmt. Ventralseitig beschreibt die Lordose eine konvexe und die Kyphose eine konkave Krümmung. Die Wirbelsäule dient als Stützgerüst, dämpft axiale Stöße und schützt das Rückenmark im Wirbelkanal. Neben ihrer statischen Funktion besitzt die Wirbelsäule auch eine dynamische Funktion. Sie ermöglicht dem Rumpf eine hohe Beweglichkeit um drei Achsen: die Beugung/Streckung (Ventralflexion/Dorsalextension), das Seitwärtsneigen (Lateralflexion) und die Drehung um die Längsachse (Rotation).

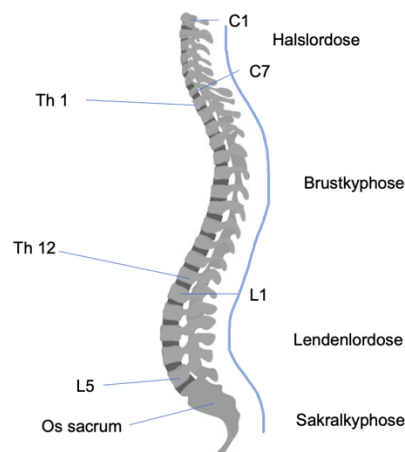


Abbildung 1: Aufbau der Wirbelsäule

## Die Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule (HWS) besteht aus 7 Wirbeln. Im Gegensatz zu den Brust- und Lendenwirbeln sind die Halswirbel kleiner und weisen eine rechteckige Form auf. Charakteristisch für den Aufbau ist das Foramen transversarium und der Processus uncinatus. Einzig Atlas (C1) und Axis (C2) weichen in ihrem Aufbau stark von der Grundform der anderen Wirbelkörper ab. Zusammen mit dem Os occipitale bilden sie das Kopfgelenk. Man unterscheidet das obere Kopfgelenk (Articulatio atlantooccipitalis) und das untere Kopfgelenk (Articulatio atlantoaxialis). Durch ihre gelenkige Verbindung ist die hohe und differenzierte Beweglichkeit des Kopfes um drei Achsen möglich. Im oberen Bereich der Halswirbelsäule von C1-C4, mit Anteilen von C5, bilden die Spinalnerven den Plexus cervicalis. Die unteren Halswirbel C5 bis C7 bilden zusammen mit dem ersten Brustwirbel (Th2) den Plexus brachialis.

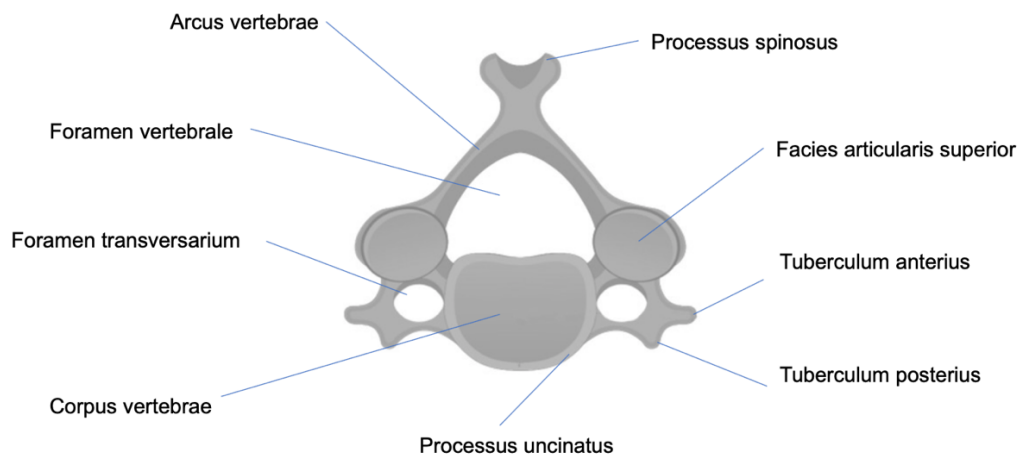


Abbildung 2: Aufbau eines Halswirbels

## Die Brustwirbelsäule

Die Brustwirbelsäule (BWS) besteht aus 12 Wirbeln. Sie sind kräftiger und stabiler als die Halswirbel und weisen eine hufförmige Form auf. Charakteristisch für ihren Aufbau ist die Fovea costalis superior und inferior. Über diese Gelenkflächen sind die Rippen mit den Brustwirbeln verbunden. Aus dem Bereich der BWS gehen die thorakalen Spinalnerven (Nervi thoracici) hervor.

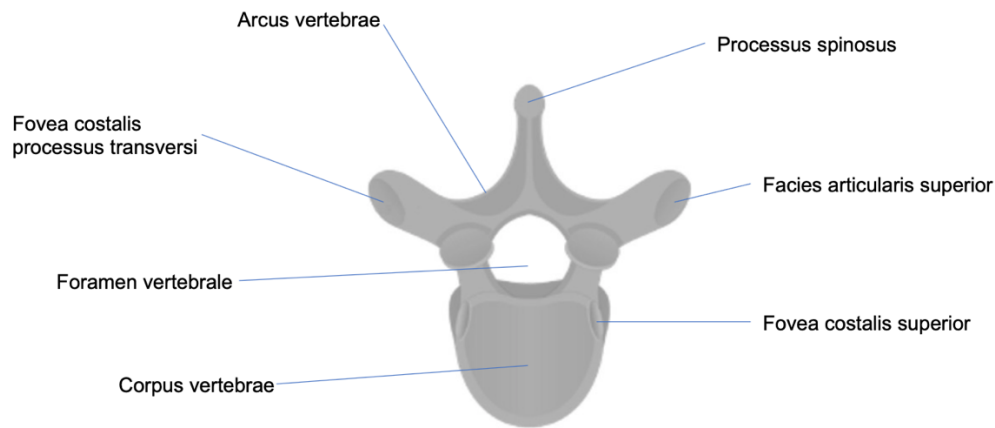


Abbildung 3: Aufbau eines Brustwirbels

## Die Bandscheiben

Zwischen zwei benachbarten Wirbelkörpern liegt die Zwischenwirbelfuge. Diese beinhaltet die Bandscheiben und die Uncovertebralgelenke in der HWS. Die Bandscheiben befinden sich zwischen jedem Wirbelkörper mit Ausnahme des ersten und zweiten Halswirbels. Sie dienen der Abfederung und Druckverteilung. Die Bandscheibe ist mit dem umliegenden Wirbelkörper verwachsen und bildet eine Symphyse. Sie bestehen aus Faserknorpel und straffem kollagenem Bindegewebe (Anulus fibrosus), sowie einem gallertartigem Wasserkern (Nucleus pulposus).

## Die Bänder

Die Wirbelkörper und die Bandscheiben sind mit verschiedenen Bändern zu einer Einheit verbunden. Ihre Funktion besteht in der Stabilisation der Wirbelsäule. Das Ligamentum longitudinale anterius verläuft ventralseitig vom Os occipitale bis zum ersten Sakralwirbel. Es ist mit der Kortikalis der Wirbelkörper verwachsen. Das Ligamentum longitudinale posterius läuft dorsalseitig über die volle Länge der Wirbelsäule. Es ist mit den Bandscheiben verwachsen. Zwischen den Enden der Dornfortsätze von C7 bis zum Os sacrum verläuft das Ligamentum supraspinale und geht an der HWS in das Ligamentum nuchae über und verläuft bis zu der Protuberiana occipitalis externa. Die Ligamenta flava grenzen das Wirbelloch nach vorne und hinten ab. Sie kennzeichnen sich durch ihren hohen Gehalt an elastischen Fasern und der daraus entstehenden charakteristischen

Gelbfärbung. Die Querfortsätze sind über die Ligamenta intertransversaria und die Dornfortsätze über die Ligamenta interspinalia miteinander verbunden.

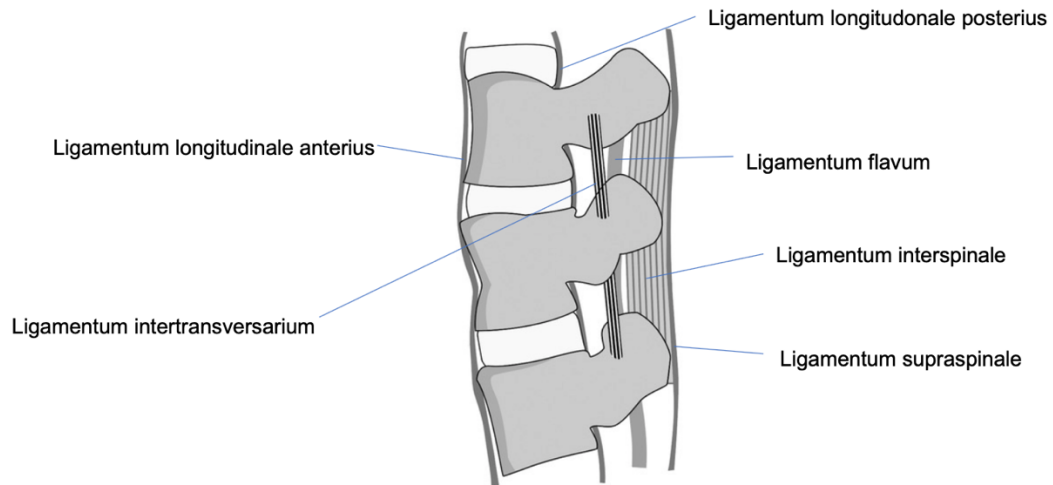


Abbildung 4: Bänder der Wirbelsäule

## Der Spinalkanal

Innerhalb des Spinalkanals liegt das Rückenmark. Es verbindet verschiedene Nervenzentren und dient der Verschaltung von spinalen Reflexen.

Das Rückenmark wird von den Hirnhäuten geschützt. Außen befindet sich die Dura mater, in der Mitte die Arachnoidea und innen die Pia mater. Zwischen Pia mater und Dura mater liegt ein mit Liquor gefüllter Spalt. Die Dura mater ist durch den Epiduralraum und dem darin enthaltenen Fettgewebe und Nervengeflecht vom Periost des Spinalkanals getrennt. Das Rückenmark erstreckt sich vom Foramen magnum des Schädels bis zum Hiatus sacralis des Kreuzbeins. Durch die Foramina intervertebralia treten die Spinalnerven aus dem Rückenmark aus bzw. ein.

Im Querschnitt lässt sich zentral eine schmetterlingsförmige graue Substanz erkennen. Sie besteht überwiegend aus Zellkörpern (Perikarya) von Nervenzellen (Neuronen). Um diese herum befindet sich eine weiße Substanz, die mehrheitlich aus Fortsätzen (Axonen) von Neuronen besteht. Die weiße Substanz wird in Hinter-, Seiten- und Vorderstrang unterteilt. Diese verbinden das Rückenmark mit dem Gehirn. Der Hinterstrang führt sensible (afferente) Fasern, wohingegen der Vorder- und Seitenstrang sensible und motorische (efferente) Fasern führt.

## 1.2 Definition und Epidemiologie

### **Spinalkanalstenose**

Die Spinalkanalstenose ist definiert als Volumenabnahme des Spinalkanals. Sie tritt auf, wenn der Spinalkanal aufgrund degenerativer Veränderungen (Spondylose) oder einem Trauma verengt ist (Dützmann et al., 2019, Lebl et al., 2015). Durch die Kompression kann es zu einer funktionellen Schädigung des Myelons und der versorgenden Blutgefäße kommen. Für die Symptomatik ist die Lokalisation der Stenose entscheidend. Sie kann auf zervikaler als auch auf thorakaler und/oder lumbaler Ebene vorkommen.

### **Spondylose**

Eine Spondylose ist die Arthrose der Wirbelgelenke (Spondylosis deformans). Sind die Facettengelenke betroffen, spricht man von einer Spondyloarthrose (Spondyloarthrosis deformans). Die Spondylose äußert sich durch knöcherne Randbauten an den Wirbelkörpern. Statische Belastungen mit Erschütterungen, unphysiologische Bewegungen und Bewegungsmangel fördern degenerative Wirbelsäulenerkrankungen (Heipertz, 1978).

### **Myelopathie**

Eine Myelopathie beschreibt einen pathologischen Prozess, der das Rückenmark betrifft (Altgr. „Myelon“ für Rückenmark und „Pathos“ für Krankheit oder Schädigung). Sie kann primär im Rückenmark, oder sekundär z.B. durch Kompression entstehen (Kranz et al., 2019).

### **Zervikale und thorakale spondylotische Myelopathie**

Der Zusammenhang zwischen der spondylotischen Kompression des Rückenmarks und der daraus resultierenden zervikalen Myelopathie wurde bereits anfangs der 1950er Jahre von Brain und Clarke beschrieben (Brain et al., 1952, Clarke et al., 1956). Die zervikale spondylotische Myelopathie (ZSM) entsteht meist durch degenerative Veränderungen der Halswirbelsäule und stellt somit eine der häufigsten Rückenmarkserkrankungen der älteren Bevölkerung dar. Sie weist eine Prävalenz für das männliche Geschlecht auf und ist in der asiatischen Bevölkerung weiter verbreitet als in der kaukasischen Bevölkerung

(Kalsi-Ryan et al., 2013). Patienten über 55 Jahre sind von der ZSM am häufigsten betroffen (Klineberg, 2010). Die ZSM betrifft vor allem das Rückenmark in Höhe der Segmente C5-C7 der Halswirbelsäule (Ludolph, 2017). Die genaue Inzidenz und Prävalenz der Krankheit ist jedoch unklar und bleibt auf globaler Ebene schwer beurteilbar (Boogaarts et al., 2015).

Insgesamt werden steigende Inzidenzraten und Operationszahlen beobachtet (Fehlings et al., 2013, Nouri et al., 2015). Im Hinblick auf die allgemeine Alterung der Bevölkerung, werden die Gesundheitssysteme weltweit mit einer Zunahme an Patienten mit degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen rechnen müssen (Fehlings et al., 2013).

Wesentlich seltener wird über die degenerative thorakale Spinalkanalstenose (TSS) und der daraus resultierenden spondylotischen Myelopathie berichtet. Im Vergleich zu der zervikalen oder lumbalen Spinalkanalstenose kommt sie deutlich seltener vor (Dützmann et al., 2019). Größere TSS-Fallserien sind nur für den asiatischen Raum verfügbar. Diese zeigen eine Dominanz des männlichen Geschlechts mit einem mittleren Alter der Patienten unter 60 Jahren. Als Lokalisation wurden die oberen Segmente Th1-Th4 und die unteren Segmente Th8-Th12 beschrieben. Für die westlichen Länder sind kaum Daten in der Literatur vorhanden (Aizawa et al., 2007, He et al., 2014, Hou et al., 2016, Zhong et al., 2016).

### 1.3 Ätiologie und Pathologie

Im Laufe des Lebens erfährt die Wirbelsäule verschiedene arthritische und spondylotische Umbauprozesse (Kalsi-Ryan et al., 2013). Muskuloskelettale Strukturen, wie die Wirbelsäule, sind erheblichen Belastungen ausgesetzt sind und können eine beschleunigte Abnutzung erfahren. Zu den betroffenen Strukturen zählen die Bandscheiben, die Facettengelenke, die Uncovertebralgelenke, das Ligamentum flavum und das Ligamentum longitudinale posterius (Iyer et al., 2016).

#### 1.3.1 Ätiologie der zervikalen und thorakalen spondylotischen Myelopathie

Die Ätiologie der zervikalen-, thorakalen- und lumbalen Stenose ist ähnlich. (Dimar et al., 2008). Sowohl statische als auch dynamische Faktoren spielen bei der Kompression des Rückenmarks eine Rolle. Zu den statischen Faktoren

zählen die strukturellen spondylotischen Veränderungen, die eine Stenose und somit eine Kompression des Myelons verursachen (Karadimas et al., 2013). Wenn die Bandscheiben ihre tragenden und lastübertragenden Funktionen nicht mehr erfüllen können, verändert sich die Biomechanik der Wirbelsäule. Um entstehende Hypermobilitäten zu stabilisieren, entwickeln sich osteophytäre Randannbauten und das Ligamentum flavum versteift sich. Die Bandscheibendegeneration, die Spondylose und die Hypertrophie des Ligamentum flavums sind die drei statischen Faktoren, die zu einer Kompression des Myelons führen können (Fehlings et al., 2013). Die dynamischen Faktoren beschreiben wiederholte Verletzungen, die bei Flexions- oder Extensionsbewegungen auf das bereits komprimierte Myelon einwirken können (Karadimas et al., 2013).

### 1.3.2 Pathologie der zervikalen und thorakalen spondylotischen Myelopathie

Die Pathogenese der ZSM ist multifaktoriell (Iyer et al., 2016). In der Halswirbelsäule werden zusätzlich die Uncovertebralgelenke vermehrt belastet und flachen dadurch ab. Neben einer Arthrose der Uncovertebralgelenke und/oder dorsalen Wirbelgelenke mit Osteophytenbildung kann es zu Bandscheibenvorfällen, einer ligamentären Hypertrophie/Ossifikation des Ligamentum flavum (OLF) oder des hinteren Längsbandes kommen (OPLL) (Tetreault et al., 2015a).

Eine durch TSS verursachte Myelopathie ist viel seltener als an der Hals- oder Lendenwirbelsäule (Dützmänn et al., 2019). Im Vergleich zu der Halswirbelsäule ist die Brustwirbelsäule relativ stabil. Da der thorakale Wirbelkanal relativ schmal ist und das Rückenmark nur schwach durchblutet ist, können sich schwere neurologische Symptome entwickeln (Hou et al., 2016). Die Kompression des Rückenmarks im Thorakalbereich wird am häufigsten durch OLF, OPLL und Bandscheibenvorfälle verursacht (Hou et al., 2016, Onishi et al., 2016). Die OLF ist eine seltene Ursache, die noch nicht gut verstanden ist (Osman et al., 2018). In europäischen und nordamerikanischen Fallserien werden Stenosen der unteren BWS häufig im Zusammenhang mit kongenitalen Anomalien, wie z.B. Achondroplasie, der Juvenilen rheumatoiden Arthritis oder Morbus Paget beobachtet (Dützmänn et al., 2019, Palumbo et al., 2001).

Die dauerhafte Einengung des Myelons führt zu einer direkten Schädigung der Myelinscheide, des Axons und des Zellsomas und dadurch zu motorischen und sensiblen Symptomen (Ludolph, 2017). Letztendlich führt die mechanische Kompression über entzündliche und vaskuläre Prozesse zu zellulären Dysfunktionen und einer Apoptose des neuralen Gewebes (Karadimas et al., 2013, Wilson et al., 2017).

#### 1.4 Klinik und Diagnostik

##### 1.4.1 Symptomatik

Patienten mit einer zervikalen Spinalkanalstenose weisen diverse Symptome auf, die zu Beginn der Erkrankung schwer einzuordnen sind (Uhl et al., 2006). Der Verlauf ist meist schleichend, jedoch treten bei manchen Patienten die Symptome akut oder subakut nach einem Sturz oder einer anderen Verletzung im Kopf-Hals-Bereich auf (Tracy et al., 2010). Zu den Symptomen gehören in der Regel Schmerzen im Bereich des Nackens und/oder der oberen Extremität. Im weiteren Verlauf berichten Patienten über Schwäche, Steifheit und Gefühlsstörungen der Extremitäten. Es folgen Gangstörungen, oft mit Ungleichgewicht, und der Verlust der Feinmotorik. Der Verlust der Feinmotorik äußert sich vor allem beim Greifen von Gegenständen, beim Zuknöpfen von Anziehsachen und/oder beim Schreiben (Emery, 2001, Iyer et al., 2016, Lebl et al., 2015, Tracy et al., 2010, Uhl et al., 2006). Blasen- und Mastdarmstörungen mit erhöhter Miktionsdringlichkeit wurden neben Sexualfunktionsstörungen ebenfalls im Zusammenhang mit Spinalkanalstenosen im Zervikalbereich beschrieben (Tracy et al., 2010, Uhl et al., 2006). Die Ausprägung der Symptome unterscheidet sich bei jedem Patienten und hängt von der betroffenen Lokalisation der zervikalen Ebene ab (Lebl et al., 2015, Yarbrough et al., 2012).

Pathologien der Brustwirbelsäule sind nicht sehr häufig. Die durch degenerative Veränderungen verursachte thorakale Myelopathie schreitet langsam voran (Aizawa et al., 2007). Gang- und Gefühlsstörungen gehören zu den häufigsten Symptomen. Zudem können Taubheitsgefühle in Kombination mit einer Schwäche der unteren Extremitäten auftreten (Barnett et al., 1987, Dützmann et al., 2019). Erkrankungen der HWS oder LWS können die gleichen neurologischen Symptome hervorrufen und dadurch zu einer Fehldiagnose führen (Aizawa et al., 2007, Hou et al., 2016, Takenaka et al., 2014). Je nach



Schweregrad der Myelopathie treten Blasen-, Defäkations- und/oder Sexualfunktionsstörungen auf (Chen et al., 2015, Dützmann et al., 2019, He et al., 2014). Eine japanische Studie zeigte, dass es einen Zusammenhang zwischen der neurologischen Symptomatik und der anatomischen Komplexität der unteren Brust- bzw. oberen Lendenwirbelsäule gibt (Takenaka et al., 2014).

#### 1.4.2 Klinische Untersuchung

Bei der neurologischen Untersuchung des Patienten muss auf Sensibilitätsstörungen, Paresen, Beeinträchtigung der Reflexe, pathologische Reflexe und Atrophien der Handmuskulatur geachtet werden. Sie dient der Bestätigung einer vorliegenden Funktionsstörung des Rückenmarks (Kalsi-Ryan et al., 2013). Während die Reflexe an den oberen Extremitäten oft abgeschwächt (positives Hoffmann-Zeichen) sind, kann es an den unteren Extremitäten zu einer spastischen Tonuserhöhung und Reflexsteigerung (positives Babinski-Zeichen) kommen (Chen et al., 2015, Dimar et al., 2008, Iyer et al., 2016, Uhl et al., 2006). Es ist zu beachten, dass das Hoffmann-Zeichen insbesondere bei jüngeren Patienten signifikante falsch-positive Ergebnisse aufweist (Harrop et al., 2010). Ein sehr empfindlicher und spezifischer Marker für eine Myelopathie im oberen Zervikalbereich (C2-C4) ist der hyperaktive Pectoralisreflex (McCormick et al., 2020). Bei den Gangproben wird eine deutliche Unsicherheit beobachtet (Baron et al., 2007, Uhl et al., 2006). Durch die Kompression des Tractus spinothalamicus kann es zu Veränderungen der Tiefensensibilität, bzw. der Schmerz- und Temperaturempfindung sowie der Propriozeption kommen (McCormick et al., 2020, Pepke et al., 2018).

#### **Differentialdiagnostik**

Differentialdiagnostisch sollte an Tumoren, spinale Ischämien, Infektionen des Rückenmarks, Erkrankungen des Nervensystems, eine Syringomyelie (Höhlenbildung der grauen Substanz aufgrund einer Liquorabflussstörung), Vitamin B12-Mangel (Funikuläre Myelose) und zerebrale Ursachen gedacht werden. Bei älteren Patienten besteht ein höheres Risiko, eine periphere Nervenerkrankungen zu entwickeln und dadurch die Gefahr, Symptome wie z.B. Sensibilitätsstörungen oder eine Hyperreflexie fehlzuinterpretieren (Uhl et al., 2006). Daher ist die Erfassung von Gefäßrisikofaktoren wie z.B. Diabetes mellitus und arterieller Hypertonie von großer Bedeutung. Bei Verdacht auf eine

chronisch entzündliche ZNS-Erkrankung sollte eine Liquoruntersuchung erfolgen (Ludolph, 2017).

#### 1.4.3 Bildgebende Diagnostik

##### **Röntgen**

Bei Verdacht auf eine Stenose der HWS und/oder BWS wird eine Bildgebung veranlasst, um das Ausmaß der Kompression auf das neurale Gewebe bestimmen zu können (Kalsi-Ryan et al., 2013). Radiologische Veränderungen treten bei den meisten Patienten über 50 Jahren auf (Emery, 2001). Um die Stabilität der Wirbelsäule und das Vorhandensein einer Spondylolyse oder Spondylolisthesis beurteilen zu können, werden präoperativ Röntgenaufnahmen in Flexions- und Extensionsstellung angefertigt.

##### **Magnetresonanztomographie**

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist bei Verdacht auf Stenosen der HWS und der BWS das Diagnostikinstrument der Wahl (Dützmann et al., 2019, Palumbo et al., 2001, Tracy et al., 2010). Im MRT können das Myelon, die Nervenwurzeln und der Liquor am besten visualisiert werden. Dabei liefern T-2 Aufnahmen die beste Kontrastauflösung (Milligan et al., 2019). Bei Aufnahmen der Brustwirbelsäule sollte darauf geachtet werden, dass die lumbale Wirbelsäule mit abgebildet ist (Dützmann et al., 2019). Mit Hilfe einer MRT-Aufnahme kann die Diagnose bestätigt und das Ausmaß, die Anzahl sowie der Schweregrad der Stenose bestimmt werden. Zusätzlich kann der anterior-posteriore Durchmesser und die transversale Fläche des Spinalkanals ermittelt werden. Bei einer schwereren oder lang bestehenden Kompression besteht in der T-2 Aufnahme eine intramedulläre Hyperintensität (Myelopathiesignal) auf der Höhe der Stenose (Harrop et al., 2010, Tetreault et al., 2015a, Uhl et al., 2006). Das Myelopathiesignal entspricht einer Gliose und einem Ödem (Ludolph, 2017).

##### **Computertomographie**

Eine Computertomographie dient zusätzlich der besseren Beurteilung einer Spondylose (Baron et al., 2007). Sie ist vor allem bei Patienten, bei denen ein MRT kontraindiziert ist, wie z.B. bei schwerer Klaustrophobie oder einem Herzschrittmacher, das Diagnostikum der Wahl. (Tetreault et al., 2015a). Zudem

ist die CT-Aufnahme eine hilfreiche Ergänzung, um knöcherne Verhältnisse besser beurteilen zu können (Tracy et al., 2010).

## 1.5 Therapie

Die Therapieplanung erfolgt individuell. Sie sollte sich nach dem Alter des Patienten, der Ausprägung und Dauer der klinischen Symptomatik, der Art und Schwere der neurologischen Symptomatik, der bildgebenden Diagnostik und der Verschlechterungsrate richten (Ludolph, 2017, Tracy et al., 2010).

### 1.5.1 Nicht operative Therapie

Bis heute gibt es keinen einheitlichen Therapieansatz zu einer nicht operativen Behandlung der ZSM. Dies ist vermutlich auf die multifaktorielle Pathogenese zurückzuführen (McCormick et al., 2020).

Bei fehlender oder geringer klinischer Progredienz, höherem Lebensalter und einem unauffälligen neurologischen Befund wird ein nicht operativer Therapieansatz empfohlen (Kadanka et al., 2011, Tracy et al., 2010).

Im Rahmen der nicht operativen Therapie werden schmerzstillende und entzündungshemmende Medikamente sowie physiotherapeutische Maßnahmen empfohlen. Zudem werden in der Literatur die Verordnung von Wärmetherapien, Halskrausen, Bettruhe, Psychopharmaka und physikalischer Therapie im Rahmen einer ZSM-Behandlung beschrieben (McCormick et al., 2020, Tracy et al., 2010). Längeres Tragen von Halskrausen kann allerdings zu einem Abbau der Halsmuskulatur und dadurch zu einer weiteren Destabilisierung der HWS führen (Uhl et al., 2006). Hinzu kommt, dass die Patienten geschult werden sollten. Das Ausüben von Hochrisikoaktivitäten, eine körperliche Überbelastung und die Fortbewegung auf rutschigen Oberflächen sollten nach Möglichkeit vermieden werden (Rao et al., 2006).

Der Zustand des Patienten und der Krankheitsverlauf sollte in engen Intervallen beobachtet werden (Emery, 2001, Rhee et al., 2013). Laut einer selektiven Literaturübersicht kommt es bei 20%-60% der Patienten zu einer Verschlechterung des neurologischen Zustands, wenn kein operativer Eingriff erfolgt (Karadimas et al., 2013). Außerdem kann mit einer neurologischen Verschlechterung gerechnet werden, wenn das Rückenmark ringförmig

komprimiert ist (Shimomura et al., 2007). Sollte sich der Zustand des Patienten nach konservativer Behandlung nicht verbessert oder sogar verschlechtert haben, sollte ein chirurgischer Eingriff vorgenommen werden (McCormick et al., 2020).

Im Hinblick auf die nicht-operative Therapie der thorakalen Spinalkanalstenose kann eine abwartende Haltung nur empfohlen werden, solange die Patienten leichte Symptome aufweisen. Sobald sich der Zustand des Patienten verschlechtert, sollte operiert werden (Chen et al., 2015). Den anatomischen Gegebenheiten der thorakalen Wirbelsäule zufolge können sich schwere neurologische Symptome entwickeln, sobald eine Kompression auftritt. Ein Eingriff sollte erfolgen, wenn sich der neurologische Status des Patienten verschlechtert und dieser eindeutig auf die spondylotischen Veränderungen zurückzuführen ist (Tracy et al., 2010).

#### 1.5.2 Operative Therapie

Ziel der operativen Therapie ist es, eine Dekompression des Myelons unter Erhalt der Stabilität zu erreichen (Dütmann et al., 2019, Pepke et al., 2018, Tetreault et al., 2015a, Tracy et al., 2010). Hinsichtlich der Verbesserung des neurologischen und funktionellen Status sowie der Lebensqualität wird ein chirurgischer Eingriff in der Behandlung der ZSM empfohlen (Fehlings et al., 2015). Es konnte gezeigt werden, dass ein chirurgischer Eingriff auch bei Patienten mit einer symptomatischen thorakalen Spinalkanalstenose in der Regel indiziert ist (Chen et al., 2015).

Es stehen verschiedene chirurgische Optionen zur Verfügung. Die Entscheidung für den jeweiligen Zugang sollte in Abhängigkeit von der Lokalisation, Höhe und dem Grad der spondylotischen Veränderung, der sagittalen Ausrichtung und Stabilität der Wirbelsäule sowie der Erfahrung des Operateurs erfolgen (Rao et al., 2006). Im Rahmen der Dekompression wurden vorderer, hinterer oder kombinierter Zugangsweg beschrieben (Pepke et al., 2018). Die Dekompressionsverfahren können mit oder ohne additive Stabilisation durchgeführt werden. Zu den anterioren Dekompressionsverfahren zählen die Diskektomie mit/ohne Fusion (ACDF) und die Corporektomie mit/ohne Fusion (ACF). Zu den posterioren Dekompressionsverfahren gehören die Laminektomie

mit/ohne Fusion und die Laminoplastie mit/ohne Fusion (Lawrence et al., 2013, Mielke et al., 2015, Tracy et al., 2010).

Bei ZSM Patienten mit kyphotischer Fehlstellung, einer Stenose auf 1-2 Segmenten, einer OPLL oder ventralen Osteophyten ist eine Entlastung von ventral in der Regel indiziert. Zervikale Spinalkanalstenosen, die von dorsal verursacht werden oder sich über mehrere Segmente strecken, sollten bei Vorliegen einer erhaltenen HWS-Lordose über einen dorsalen Zugang dekomprimiert werden (Ren et al., 2015, Wu et al., 2016).

Der häufigste beschriebene Zugang bei der Behandlung einer thorakalen Spinalkanalstenose ist die Laminektomie mit oder ohne Fusion. Hinsichtlich der klinischen Ergebnisse wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen vorderen oder hinteren Zugangswegen beschrieben (Aizawa et al., 2007, Fujimura et al., 1997, He et al., 2014, Onishi et al., 2016, Yamazaki et al., 2006).

Neben den allgemeinen Operationsrisiken können im Rahmen einer chirurgischen Dekompression intraoperative sowie postoperative Komplikationen auftreten. Neben Rückenmarksverletzungen, Nervenwurzelverletzungen, Hämatomen und Infektionen kann durch unvorsichtiges Präparieren die Dura mater einreißen und Liquor austreten. Bei dorsalen Dekompressionen kann es zu einer Schädigung der Muskulatur und Gelenkkapseln kommen. Eine weitere Komplikation ist die ungenügende Dekompression und dadurch eine Persistenz oder Verschlechterung des neurologischen Zustands. Im Falle einer Reststenose sollte über eine operative Revision nachgedacht werden. Spätkomplikationen können oft erst nach längerer Zeit auftreten und zunehmende Beschwerden verursachen. Dazu zählen neben Schmerzen die Syringomyelie und Instabilitäten sowie Deformitäten der Wirbelsäule (He et al., 2014, Jaksche et al., 2005, Reinhold et al., 2005).

Studien zu der degenerativen zervikalen Spinalkanalstenose belegen, dass eine Laminektomie oder Laminoplastie mit bilateralem Zugang häufig zu einer Ablösung sowie Atrophie der paraspinalen Muskulatur und postoperativ zu chronischen Schmerzsyndromen führen (Ashana et al., 2017, Chang et al., 2001, Draak et al., 2019, Dützmann et al., 2019, Sihvonen et al., 1993). Um die Stabilität der Wirbelsäule zu erhalten, wurde das Verfahren der erweiterten intralaminären Fensterung (EILF) entwickelt. Dieses minimalinvasive Verfahren, meist

angewandt im Rahmen von lumbalen Dekompressionsoperationen, ermöglicht die Entlastung von kurzstreckigen, meist auf das Areal des Ligamentum flavum begrenzten Stenosen unter Erhalt der die Wirbelsäule stabilisierenden Elementen wie den Lig. Interspinosi, den Wirbelgelenken und den Wirbelbögen. Neben der EILF ist die unilaterale Hemilaminektomie eine Operationstechnik für Patienten mit zervikaler spondylotischer Myelopathie. Sie ermöglicht eine bilaterale Dekompression des Myelons über einen unilateralen Zugang. Im Vergleich zu der Laminektomie oder Laminoplastie ist die Hemilaminektomie durch die nur einseitige Muskelablösung und die Vermeidung von Implantaten eine geringer invasive Methode (Mielke et al., 2015).

## 2 Fragestellung und Zielsetzung

In der Literatur wurde wiederholt von Instabilitäten und Deformitäten der Wirbelsäule nach Laminektomie oder Laminoplastie berichtet, welche möglicherweise durch einen unilateralen dorsalen Zugang vermieden werden können (Arnts et al., 2016, Della Pepa et al., 2014, Joaquim et al., 2015, Kaptain et al., 2000, Matsuoka et al., 2018, Osman et al., 2018, Sakaura et al., 2019).

Das Konzept eines unilateralen dorsalen Zugangs zum Spinalkanal, über erweiterte intralaminäre Fensterung (EILF) oder Hemilaminektomie, in Kombination mit einer bilateralen Dekompression des Duralsacks und der Nervenwurzeln über sogenannte „Undercutting“-Verfahren hat sich in neueren Fallserien zu zervikalen Spinalkanalstenosen als erfolgreich erwiesen. Wir haben daher dieses Konzept bei den Patienten mit einseitig dominierender Symptomatik bei thorakaler Spinalkanalstenose angewendet. Dadurch könnte die Destabilisierung der paraspinalen Muskulatur und der Einsatz von Implantaten vermieden und die Operationszeit sowie der intraoperative Blutverlust reduziert werden (Bu et al., 2016, Karademir et al., 2017, Mielke et al., 2015, Ren et al., 2015).

In der aktuellen Literatur finden sich keine vergleichenden Arbeiten zu uni- und bilateralen Zugangswegen und Laminektomie. Diese Studie hat zum Ziel, das klinische und bildgebende Outcome nach bilateraler dorsaler Dekompression des Myelons nach unilateraler Eröffnung des Spinalkanals mit dem nach Laminektomie bei zervikaler und thorakaler spondylotischer Myelopathie zu vergleichen. In Bezug auf epidemiologische und patientenbezogene Eigenschaften sollen Langzeitergebnis und Lebensqualität nach dorsaler Dekompression beurteilt werden.

### 3 Material und Methoden

Das Studienprotokoll wurde der Ethikkommission der Ludwig-Maximilians-Universität München vorgelegt und von ihr genehmigt (AZ 18-259).

#### 3.1 Patientengut

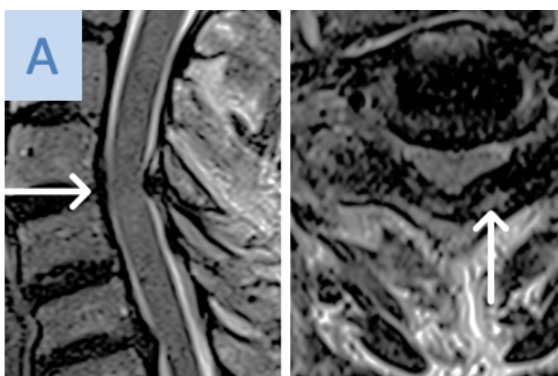
In einer retrospektiven Analyse erfolgte die Datenerhebung von insgesamt 128 Patienten, die aufgrund einer zervikalen oder thorakalen Spinalkanalstenose zwischen November 2012 bis April 2019 an der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik des Klinikums der Universität München (LMU) (Direktor: Prof. Dr. med. Jörg-Christian Tonn) operativ versorgt wurden.

Die Diagnose wurde klinisch gestellt und durch ein bildmorphologisches Korrelat in Form einer Kernspintomographie bzw. einer Computertomographie gesichert. Einschlusskriterien waren: 1) das Vorliegen einer auf ein oder mehreren Segmenten vorkommenden Spinalkanalstenose in der Magnetresonanztomographie (MRT) und/oder Computertomographie (CT); 2) keine Anzeichen für Makroinstabilität auf präoperativen Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule in Flexions-/Extensionsstellung; 3) klinische Symptome übereinstimmend mit der bildgebenden Diagnostik; und 4) Ausschluss anderer pathologischer Zustände, wie Wirbelsäulenkrümmung, Tumore, Tuberkulose, Infektionen oder stoffwechselbedingter Knochenerkrankungen.

Für die Analyse wurden lediglich Fälle mit einer operativen Dekompression über einen dorsalen Zugang herangezogen. Die ZSM-Patienten wurden je nach durchgeführter Operation in folgende Gruppen eingeteilt: unilateraler Zugang zum Spinalkanal via erweiterter intralaminärer Fensterung (EILF) (Gruppe 1) oder Hemilaminektomie (Gruppe 2), jeweils in Kombination mit einem Undercutting (UCT) oder bilateraler Zugang zum Spinalkanal via Laminektomie /Laminoplastie (Gruppe 3). Anhand der vorliegenden Symptomatik und dem radiologischen Befund wurden ein- oder beidseitige Verfahren angewendet. Bei einer einseitigen Kompression des Spinalkanals mit einseitiger Symptomatik, die meist durch eine Kombination von Bandhypertrophie und ossärer Verengung des Spinalkanals (s. Abbildung 5A und B) verursacht wurde, erfolgte eine Hemilaminektomie. Bei einer zirkulären bilateralen Kompression des Spinalkanals durch eine kombinierte ossäre und ligamentäre Pathologie (s. Abbildung 5C)



wurde ein bilaterales dorsales Verfahren zur Dekompression angewendet. Die Laminektomie wurde bevorzugt bei ein- bis zweistufigen Stenosen und die Laminoplastik bei drei- oder mehrstufigen Stenosen durchgeführt. Die TSS-Patienten wurden je nach durchgeführter Operation in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt: unilateraler Zugang zum Spinalkanal via erweiterter intralaminärer Fensterung (EILF) oder Hemilaminektomie, jeweils in Kombination mit einem Undercutting (UCT) (Gruppe 1) oder bilateraler Zugang zum Spinalkanal via Laminektomie /Laminoplastie (Gruppe 2). Nach der Operation erfolgte eine erneute Bildgebung.



Aufgrund einer bevorstehenden Publikation und den damit verbundenen Urheberrechtsrestriktionen kann Abbildung 5 B nicht abgedruckt werden.

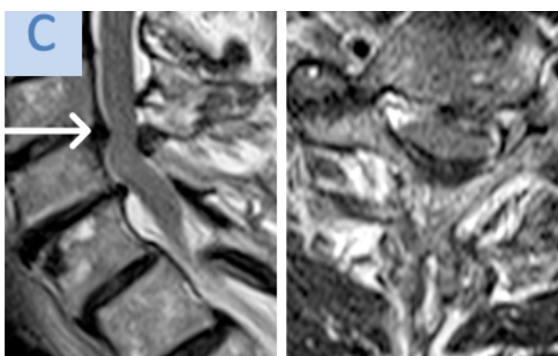


Abbildung 5: Präoperative MRT-Aufnahmen

Abbildung 5 zeigt präoperative T-2 gewichtete MRT-Aufnahmen in sagittaler und axialer Richtung. Alle Abbildungen zeigen eine schwere Einengung des

zervikalen Spinalkanals (Naganawa Grad 3) A) durch eine rechts betonte Hypertrophie des Ligamentum flavum ohne wesentliche knöcherne Veränderung; B) durch eine links betonte Hypertrophie des Ligamentum flavum und knöcherne Veränderungen; C) zirkulär durch eine Kombination von Bandhypertrophie und knöchernen Veränderungen.

### 3.2 Studienablauf

Die operations- und verlaufsrelevanten Patientendaten wurden anhand der Krankenakte und der klinikinternen SAP-Datenbank entsprechend den geltenden Datenschutzbestimmungen im Klinikum Großhadern erfasst und retrospektiv analysiert. Dabei handelte es sich um wesentliche Basisdaten der Operation, des stationären Aufenthalts und der ambulanten Nachsorge. Folgende demographische Daten wurden erfasst: Geschlecht, Alter, Body-Mass-Index (BMI) und Aufenthaltsdauer. Des Weiteren wurden folgende Begleiterkrankungen dokumentiert: Diabetes mellitus, arterielle Hypertonie (aHT), Nikotinabusus, periphere Arterielle Verschlusskrankheit (pAVK), Koronare Herzkrankheit (KHK), Karpaltunnelsyndrom, Gonarthrose, Coxarthrose, LWS-Syndrom, Osteoporose, Rheumatische Arthritis, Adipositas und Alkoholabusus. Genauere Daten zu den operativen Eingriffen, wie präoperative Symptomatik, OP-Art, OP-Höhe, OP-Seite, Blutverlust, Dauer, Komplikationen, Rezidivgeschehen und damit verbundene Operationen wurden ebenfalls erfasst.

Die Erhebung der Lebensqualität und Funktionalität im Alltag erfolgte mittels eines standardisierten Fragebogens. Ein Fragebogen bezog sich auf den Zustand der Patienten vor der Operation, der zweite Fragebogen bezog sich auf den gegenwärtigen Zustand der Patienten. Die Rücklaufquote der Fragebogenbefragung lag bei 68 Patienten / 126 kontaktierten Patienten (53,986%). Der Fragebogen umfasste allgemeine Angaben zur Person, den Patient Satisfaction Index (PSI) und die Kurzfassung des SF-36-Fragebogens (Short Form Health) Version 2. Anhand der Aktenlage konnten folgende klinische Scores erfasst werden: die Odoms's Criteria, die visuelle Analogskaala, der modifizierte Japanese Orthopaedic Association Score (mJOA), der Europäische Myelopathie Score (EMS), der Neck Disability Index (NDI), der Oswestry Disability Index (ODI) und der Barthel-Index.

### 3.3 Erläuterung der klinischen Scores

Die Angaben wurden aus den Krankenakten oder aus den ausgefüllten Fragebögen entnommen und werden im Folgenden näher vorgestellt.

#### **PSI**

Anhand des Patient Satisfaction Index (PSI) wurde die Patientenzufriedenheit mit I, II, III und IV bewertet. Antwortmöglichkeit I entspricht „Die Operation hat meine Erwartungen erfüllt“, II entspricht „Ich hatte nicht die Verbesserung, die ich erhofft hatte, aber ich würde mich für dieselben Ergebnisse erneut operieren lassen“, III entspricht „Die Operation hat geholfen, aber ich würde mich nicht für dieselben Ergebnisse erneut operieren lassen“ und IV entspricht „Mein Zustand ist der gleiche oder schlechter im Vergleich zum Zustand vor der Operation“. Die Antwortmöglichkeiten I und II wurden als „erfolgreich“ und die Antwortmöglichkeiten III und IV als „nicht erfolgreich“ angesehen (Slosar et al., 2000).

#### **Odom**

Anhand der Odom's Kriterien konnten die Patienten das Operationsergebnis mit „excellent“, „good“, „fair“ oder „poor“ bewerten. „Excellent“ entspricht der Antwortmöglichkeit „Alle vor der Operation bestehenden Symptome haben sich gelindert; abnormale Befunde haben sich gebessert“, „good“ entspricht „Die vor der Operation bestehenden Symptome sind kaum noch vorhanden; abnormale Befunde sind unverändert oder haben sich verbessert“, „fair“ entspricht „Einige der vor der Operation bestehenden Symptome haben sich gelindert; andere Symptome sind unverändert oder haben sich leicht verbessert“ und „poor“ entspricht „Die Symptome und Krankheitszeichen haben sich durch die Operation nicht verbessert oder sogar verschlechtert“. (Broekema et al., 2019, Odom et al., 1958).

#### **Die visuelle Analogskala**

Die visuelle Analogskala (VAS) diente der subjektiven Messung einer Empfindungsstärke. Die Patienten trugen auf einer Skala von 0 (=kein Schmerz) bis 10 (=stärkster vorstellbarer Schmerz) ihre Empfindung ein. In der vorliegenden Studie wurden Schmerzen der Hals- und/oder Brustwirbelsäule

und ausstrahlende Schmerzen in den Armen/Händen und/oder Brustkorb/Bauchhaut getrennt voneinander betrachtet (VAS-N, VAS-R mit N=Neck und R=Radicular) (MacDowall et al., 2018).

### **mJOA**

Der mJOA diente der Erfassung des neurologischen Status der Patienten. Dabei wurden die motorische Funktion der oberen und unteren Extremität, sensible Funktion von oberer und unterer Extremität und Stamm sowie die Blasenfunktion berücksichtigt. Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 18 Punkten (Benzel et al., 1991).

### **EMS**

Der EMS diente der neurologischen Beurteilung der zervikalen Myelopathie. Dabei wurden die Funktionen des ersten motorischen Neurons, die Funktionen des afferenten Systems und die Blasen-/Darmfunktion, sowie die Funktion des zweiten motorischen Neurons, die Funktion der Hinterstränge und der Hinterwurzeln berücksichtigt. Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 18 Punkten (Herdmann et al., 1994).

### **NDI**

Der NDI diente der Beurteilung von Alltagsfunktionen durch Beschwerden im Bereich des Nackens. Geringe Beschwerden wurden mit 0 und die stärksten vorstellbaren Schmerzen mit maximal 5 Punkten bewertet. Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 50 Punkten. Die erreichte Punktzahl wurde durch die mögliche Gesamtpunktzahl geteilt. Dieser Wert wurde mit 100% multipliziert. Ein Score unter 8% kennzeichnete keine Einschränkung, ein Score von 10-28% eine leichte Einschränkung, ein Score von 30-48% eine moderate Einschränkung, ein Score von 50-68% eine schwere Einschränkung und ein Score von über 68% eine vollständige Einschränkung (Vernon et al., 1991).

### **ODI**

Der ODI diente der Beurteilung von Alltagsfunktionen durch Beschwerden im Bereich des Rückens. Geringe Beschwerden wurden mit 0 und die stärksten vorstellbaren Schmerzen mit maximal 5 Punkten bewertet. Der Gesamtwert wird

mit 2 multipliziert und in % angegeben. Je höher der Wert, desto höher war die Funktionseinschränkung. Ein Score von 0-20% kennzeichnete eine minimale Funktionseinschränkung, ein Score von 21-40% eine moderate Funktionseinschränkung, ein Score von 41-60% eine starke Funktionseinschränkung, ein Score von 61-80% eine sehr starke Funktionseinschränkung und ein Score von 81-100% die Pflegedürftig- bzw. Bettlägerigkeit (Fairbank et al., 1980).

### **SF 36 v2**

Der SF36 Version 2 diente der Objektivierung von körperlicher und psychischer Gesundheit. Er setzte sich aus Fragen folgender Domänen zusammen: Vitalität, körperliche Funktionsfähigkeit, körperliche Schmerzen, allgemeine Gesundheitswahrnehmung, körperliche Rollenfunktion, emotionale Rollenfunktion, soziale Funktionsfähigkeit und psychisches Wohlbefinden. Der SF36 mental component score (MCS) spiegelt das psychische und der SF36 physical component Score (PCS) das physische Wohlbefinden wider. Je höher der Score, desto geringer war die Beeinträchtigung. Die Ergebnisse wurden in 2 Gruppen eingeteilt: ein Score unter 50% zeigte eine schlechtere körperliche/psychische Gesundheit als der Mittelwert (der standardisierten Normalbevölkerung) an und ein Score über 50% zeigte eine bessere körperliche/psychische Gesundheit als der Mittelwert an (Ware J, 2007).

### **Barthelindex**

Der Barthelindex diente der Beurteilung grundlegender Alltagsfunktionen im täglichen Leben. Er beinhaltete folgende Themen: Essen, Baden, Körperpflege, An-und Auskleiden, Stuhlkontrolle, Harnkontrolle, Toilettenbenutzung, Bett- bzw. Stuhltransfer, Mobilität und Treppensteigen. Die Ergebnisse wurden in 2 Gruppen eingeteilt: Eine Punktzahl von 60-95 entsprach einer weitgehenden Selbstständigkeit im Alltag mit Anspruch auf minimale Hilfe und bei einer Punktzahl von unter 60 galt der Patient als abhängig von fremder Hilfe. Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 100 Punkten (Mahoney et al., 1965).

### **3.4 Radiologische Diagnostik**

Neben der Anamnese, der klinischen Untersuchung und den Fragebögen wurde auch die radiologische Diagnostik ausgewertet.

Präoperativ wurden Röntgenaufnahmen in Flexions- und Extensionsstellung angefertigt, um die Stabilität der Wirbelsäule und das Vorhandensein einer Spondylolyse oder Spondylolisthesis beurteilen zu können. Die Daten wurden aus dem röntgenologischen Befund der Patientenakte übernommen.

Um die Höhe, den Schweregrad und den Umfang der Dekompression beurteilen zu können, wurden prä- und postoperativ MRT-Aufnahmen sagittal und axial in der T-2 Wichtung und/oder CT-Aufnahmen ausgewertet. Folgende Parameter wurden auf der Höhe der maximalen Stenose ausgemessen: der Durchmesser des Spinalkanals in anterior-posteriorer (AP) Richtung; der Durchmesser des anterioren und posterioren Liquor-Raums; der Schweregrad der Stenose anhand der Naganawa-Skala mit folgenden Graden: Grad 0 – keine Stenose, normale Breite des Spinalkanals, keine Anzeichen einer Verschmälerung des Liquorraumes anterior und/oder posterior; Grad 1 – leichte Stenose, partielle Kompression des Duralsacks und geringgradige Spinalkanalstenose; Grad 2 – mäßige Stenose, Verschmälerung des Liquorraumes anterior und/oder posterior mit nicht oder gering deformiertem Rückenmark, Grad 3 – schwere Stenose, Verschmälerung des Liquorraumes anterior und/oder posterior und sehr stark deformiertes Rückenmark (Naganawa et al., 2011). Die Signalintensitäten der sagittalen T2 gewichteten MRT-Aufnahmen wurden aus dem radiologischen Befund übernommen.

Eine postoperative bildgebende Diagnostik erfolgte stets und standardisiert im Falle einer persistierenden Restsymptomatik oder postoperativ neu aufgetretener Beschwerden.

### 3.5 Indikationen und Operationen

Die Patienten wurden während der Operation auf dem Bauch gelagert, um einen optimalen Zugang zu der Wirbelsäule zu erlangen. Das Zielsegment und die Schnitthöhe wurden unter Röntgenkontrolle festgelegt. Alle Operationen wurden von einem erfahrenen neurochirurgischen Ober- oder Facharzt mit langjähriger OP-Erfahrung im Wirbelsäulenbereich durchgeführt oder beaufsichtigt.

Im Fall einer dorsalen Dekompression im Bereich der HWS wurde der Kopf zur Extension und Fixierung der HWS in allen Fällen mit der Mayfieldklemme fixiert.

Nachdem der knöchernen Situs freigelegt und dargestellt wurde, erfolgten alle weiteren Schritte mit Hilfe eines OP-Mikroskops.

Bei dem einseitigen Zugang erfolgte ein paramedianer Hautschnitt und die paraspinale Rückenmuskulatur wurde vom Periost gelöst. Im Falle einer Laminotomie bei ZSM wurde die kaudale bzw. kraniale Hälfte der angrenzenden Laminae entfernt und mit einer Resektion des Ligamentum flavum kombiniert.

Nachdem der mediale Rand der Wirbelgelenksfacette dargestellt wurde, erfolgte je nach Schweregrad der Kompression eine EILF oder eine Hemilaminektomie. Der Operationstisch wurde leicht zur kontralateralen Seite geneigt, um einen besseren Einblick in das Operationsfeld zu erhalten. In einem crossover „undercutting“ Verfahren erfolgte die Resektion der meist durch eine Hypertrophie des Ligamentum flavum bedingten Stenose. Im Bedarfsfall wurden die Teile der kontralateralen Lamina-Innenseite und ggf. mediale Osteophyten des kontralateralen Gelenks zusätzlich entfernt.

Wenn im Fall einer TSS zusätzlich ein Bandscheibenprolaps vorlag, wurde nach Dekompression des Spinalkanals das hintere Längsband dargestellt und inzidiert, um subligamentäre Anteile des Bandscheibenprolaps zu entfernen. Bei Bedarf wurde auf der Seite der EILF/Hemilaminektomie eine Foraminotomie zur Erweiterung des Neuroforamens durchgeführt.

Bei der Laminektomie oder der Laminoplastie erfolgte ein medianer Hautschnitt entlang der Dornfortsätze. Die Rückenmuskulatur wurde beidseits entlang der Laminae nach lateral präpariert. Danach wurden bei der Laminektomie die Dornfortsätze reseziert. Beidseits wurden die Laminae in cranio-kaudaler Richtung mit Hilfe eines Diamantbohrers entlang der medialen Wirbelgelenksfacetten und unter Schonung der Gelenkkapsel ausgedünnt. Anschließend wurden das Ligamentum flavum und die Laminae vollständig exzidiert. Bei der Laminoplastie wurden die Laminae unilateral median der Facetten durchgefräst und gegenüber angefräst, damit ein Scharnier entsteht. Die Laminae wurden dann angehoben und mit Titan-Miniplatten und Schrauben so fixiert, dass eine ausreichende Erweiterung des Spinalkanals erreicht wird.

### 3.6 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit SigmaPlot für Windows, Version 11.0 (Systat Software, Inc). Die Patientenpopulation wurde mittels zusammenfassender Statistiken beschrieben. Zum Vergleich beider Gruppen wurde der Student's t-Test für numerische Werte, der Mann-Whitney Rank Sum-Test für ordinale Variablen und der  $\chi^2$ -Test für nominale Variablen verwendet.

Zur Untersuchung von Risikofaktoren (Geschlecht, Alter, Komorbiditäten, Dauer und Art/Ausmaß der Symptome, chirurgisches Vorgehen), die möglicherweise mit Komplikationen, Reoperationsraten und klinischem Ergebnis (mJOA-Verbesserung beim letzten Follow-up) verbunden sind, wurden logistische Regressions-/Korrelationsanalysen für uni- und multivariable Tests verwendet. Die Ergebnisse wurden entweder als verbessert oder stabil (1) oder als verschlechtert (2) kategorisiert. Die statistische Signifikanz wurde durch einen Wahrscheinlichkeitswert  $p < 0,05$  bestimmt.

Das Kriterium eines minimalen klinisch bedeutsamen Unterschieds (MCID) galt als erfüllt, wenn die postoperative mittlere Verbesserung größer als die Standardabweichung für die jeweilige numerische Zielvariable war (Draak et al., 2019). Für den mJOA wurde eine postoperative Verbesserung  $\geq 2$  Punkte als Cut-off-Wert beschrieben (Tetreault et al., 2015b).



## 4 Ergebnisse

### 4.1 Beurteilung des Patientenkollektivs ZSM

#### 4.1.1 Demographische Ergebnisse

##### **Patientencharakteristika**

Die Gesamtzahl der ZSM-Patienten lag bei 98. 50 Patienten wurden über einen unilateralen Zugang operiert. Darunter befanden sich 32 Männer und 18 Frauen. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 32,5 Jahre alt und der älteste 87,8 Jahre. Das Verhältnis von Männern zu Frauen lag bei 1,8:1.

48 Patienten wurden über einen bilateralen Zugang operiert. Darunter befanden sich 25 Männer und 23 Frauen. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 23,5 Jahre alt und der älteste 91,7. Das Verhältnis von Männern zu Frauen lag bei 1,1:1 (s. Tabelle 1).

*Tabelle 1: Alter und Geschlecht der ZSM-Patienten*

	Dekompression via			p-Wert
	Zugang unilateral+UCT		Zugang bilateral	
	Laminotomie (n=30)	Hemilaminektomie (n=20)	Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)	
Geschlecht, männlich/ weiblich	17 / 13	15 / 5	25/ 23	0,217
Medianalter bei der 1. Operation, in Jahren (Altersgruppe)	75,3 (50,4- 87,1)	76,8 (32,5- 87,8)	74,5 (23,5- 91,7)	0,404

\*Durchschnittswerte  $\pm$  SD

##### **Symptomdauer und präoperative Symptomatik**

Die durchschnittliche Symptomdauer bis zum Zeitpunkt der 1. Operation lag bei  $16,6 \pm 23,8$  Monaten. Von 98 Patienten litten 68 Patienten (69,3%) unter Ataxie, 56 Patienten (57,1%) gaben Sensibilitätsstörungen an, bei 12 Patienten (12,2%) bestand eine Parese, 13 Patienten (13,2%) gaben Schmerzen an und bei 4 Patienten (4%) war eine vegetative Symptomatik gegeben (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Symptombdauer und präoperative Symptomatik der ZSM-Patienten

	Dekompression via			p-Wert
	Zugang unilateral+UCT		Zugang bilateral	
	Laminotomie (n=30)	Hemilaminektomie (n=20)	Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)	
Durchschnittliche Symptombdauer, in Monaten	13,3 ± 14,6	17,9 ± 42,9	18,8 ± 14,0	0,393
Präoperative Symptomatik, Anzahl in (%)				
Ataxie	20 (66,7)	7 (77,8)	41 (85,4)	0,164
Sensibilitätsstörung	18 (60,0)	9 (45,0)	29 (60,4)	0,554
Parese	3 (10,0)	3 (15,0)	6 (12,5)	0,836
Schmerzen	5 (16,7)	5 (16,7)	8 (16,7)	0,159
Vegetative Symptomatik	2 (6,7)	1 (5,0)	1 (2,1)	0,899

\*Durchschnittswerte ± SD

### Begleiterkrankungen

Von insgesamt 98 Patienten lag bei 54 Patienten (55,1%) eine kardiovaskuläre Erkrankung vor, bei 27 Patienten (27,5%) ein Diabetes mellitus, 27 Patienten (27,5%) wiesen in ihrer Vorgeschichte einen chronischen Nikotinabusus auf und 19 Patienten (19,3%) waren adipös (s. Tabelle 3).

In Bezug auf die demographischen Ergebnisse, die Symptombdauer und präoperative Symptomatik, sowie die Begleiterkrankungen bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Patienten, die über einen unilateralen

Zugang zum Spinalkanal und den Patienten, die über einen bilateralen Zugang zum Spinalkanal operiert wurden.

Tabelle 3: Begleiterkrankungen der ZSM-Patienten

Begleiterkrankung, Anzahl in (%)	Dekompression via			p-Wert
	Zugang unilateral+UCT		Zugang bilateral	
	Laminotomie (n=30)	Hemilaminektomie (n=20)	Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)	
Kardiovaskuläre Erkrankung	13 (43,3)	9 (45,0)	32 (66,7)	0,080
Diabetes mellitus	10 (33,3)	7 (35,0)	10 (20,8)	0,346
Adipositas	9 (30,0)	4 (20,0)	6 (12,0)	0,166
Nikotinabusus	8 (26,7)	4 (20,0)	15 (31,3)	0,637

#### 4.1.2 Radiologische Ergebnisse

##### Höhe und Eigenschaften der Stenose

78 Patienten wiesen eine Stenose auf 1 Segment auf, 14 Patienten wiesen eine Stenose auf 2 Segmenten auf, 4 Patienten wiesen eine Stenose auf 3 Segmenten auf und zwei Patienten wiesen eine Stenose auf 4 Segmenten auf (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Eigenschaften der Stenosen bei den ZSM-Patienten

	Dekompression via			p-Wert
	Zugang unilateral+UCT		Zugang bilateral	
	Laminotomie (n=30)	Hemilaminektomie (n=20)	Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)	
Beteiligte Segmente, Anzahl in (%)				
1 Segment	22 (73,4)	15 (75,0)	41 (85,3)	0,465
2 Segmente	6 (20,0)	5 (25,0)	3 (6,3)	
3 Segmente	1 (3,3)	0 (0)	3 (6,3)	
4 Segmente	1 (3,3)	0 (0)	1 (2,1)	

\*Durchschnittswerte ± SD

Insgesamt befanden sich 79,5% der Stenosen zwischen den Segmenten C3 und C5, 12,6% der Stenosen befanden sich zwischen den Segmenten C6 und Th1 und 7,8% der Stenosen befanden sich zwischen den Segmenten C1 und C2 (s. Abbildung 1).

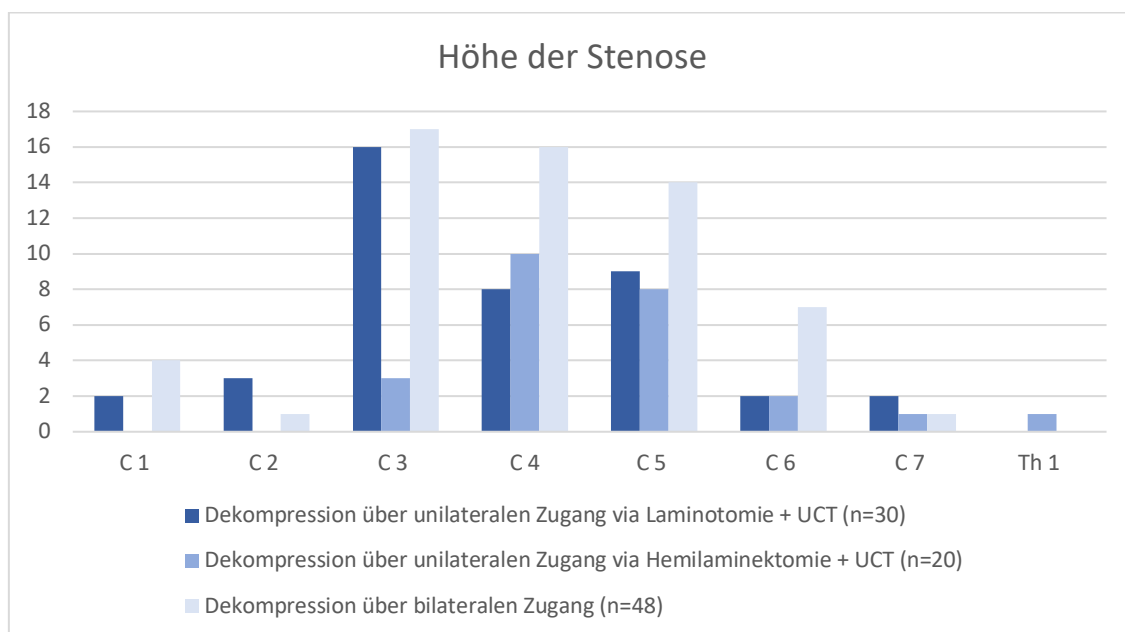


Abbildung 6: Höhe der Stenose und gewähltes operatives Verfahren

## **Pathologie der Stenose**

In allen Fällen bestand eine dorsale Kompression des Rückenmarks, die entweder durch eine Hypertrophie des Ligamentum flavum und/oder eine Hypertrophie und osteophytäre Anbauten im Bereich der Facettengelenke verursacht wurde.

### **4.1.3 Chirurgische Ergebnisse**

Die durchschnittliche OP-Dauer lag bei 126 ( $\pm$  36) min., der durchschnittliche Blutverlust lag bei 225 ( $\pm$ 179) ml und die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Patienten lag bei 9 ( $\pm$ 4) Tagen. Ein Patient wurde aufgrund einer epiduralen Nachblutung und ein anderer Patient aufgrund einer Duraläsion erneut operiert. Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden, wiesen einen etwas geringeren durchschnittlichen intraoperativen Blutverlust auf. Des Weiteren wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ersichtlich (s. Tabelle 5).

In allen Fällen konnten die Operationen wie vorgesehen durchgeführt werden und es war kein Wechsel der Operationsmethode erforderlich.

Tabelle 5: OP-Daten und Komplikationen der ZSM-Patienten

	Dekompression via			p-Wert
	Zugang unilateral+UCT		Zugang bilateral	
	Laminotomie (n=30)	Hemilaminektomie (n=20)	Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)	
Durchschnittliche OP-Dauer, in min	134 ± 39	119 ± 32	125 ± 37	0,404
Durchschnittlicher intraoperativer Blutverlust, in ml	222 ± 122	164 ± 81	256 ± 226	0,181
Durchschnittliche Aufenthaltsdauer, in Tagen	8 ± 3	9 ± 5	9 ± 3	0,542
Komplikationen, Anzahl	0	1 (Epidurales Hämatom)	1 (Duraläsion)	0,476

\*Durchschnittswerte ± SD

#### 4.1.4 OP-Erfolg und Langzeitergebnisse

Bei allen Patienten waren die vollständigen präoperativen und patientenbezogenen Langzeitergebnisse für die Auswertung des mJOA, des VAS und des Barthel-Index vorhanden. Für die fragebogenbasierte Auswertung des SF-36v2 und des NDI lagen zum Zeitpunkt der letzten Nachsorgeuntersuchung die Daten von 68% (34/50) der Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden und die Daten von 56% (27/48) der Patienten, die über einen bilateralen Zugang operiert wurden, vor. Hinsichtlich der patientenbezogenen Langzeitergebnisse ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen.

Unabhängig von der operativen Methode belegten postoperative MRT-Aufnahmen bei allen Patienten eine ausreichende Dekompression des Rückenmarks. Der mediane präoperative Naganawa Grad lag bei 3, wohingegen der mediane postoperative Naganawa Grad bei 0 lag. Der durchschnittliche postoperative Spinalkanaldurchmesser in anterior-posteriorer Richtung lag bei 11,4 (±3,6) mm.

Die Verbesserung des VAS und des mJOA bei der Langzeituntersuchung war ebenfalls unabhängig von der gewählten operativen Methode. Der mediane präoperative VAS fiel von 4 auf 0,25 beim letzten Follow-up (FU) und der mediane präoperative mJOA stieg von 12 auf 14 beim letzten FU.

Hinsichtlich der Beurteilung der grundlegenden Alltagsfunktionen zeigte sich in allen Gruppen eine Verbesserung. Dabei ergab sich ein medianer Barthel-Index von 95. Im Hinblick auf den mittleren NDI und den SF36v2 bei der letzten Nachsorgeuntersuchung ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen allen Gruppen.

Die subjektive Patientenzufriedenheit lag postoperativ bei einem PSI-Score von II (entspricht „Ich hatte nicht die Verbesserung, die ich erhofft hatte, aber ich würde mich für dieselben Ergebnisse erneut operieren“), während das postoperative allgemeine klinische Langzeitergebnis nach den Odom-Kriterien als „fair“ (entspricht „Einige der vor der Operation bestehenden Symptome haben sich gelindert; andere Symptome sind unverändert oder haben sich leicht verbessert“) eingestuft wurde.

Keiner der Patienten benötigte eine Fusionsoperation aufgrund einer sekundären Instabilität bei der Langzeituntersuchung. Der Anteil der Patienten, die in einem angrenzenden Segment erneut operiert werden mussten, war in beiden Gruppen ähnlich (unilateral: 6,0% ggb. bilateral: 6,3%). Im Gegensatz dazu war der Anteil der Patienten, die im gleichen Segment erneut operiert werden mussten, in der unilateralen Gruppe höher (unilateral: 8,0% ggb. bilateral: 0%). Im Durchschnitt lagen  $6,2 \pm 4,0$  Monate zwischen der 1. Operation und der Reoperation (s. Tabelle 6 und 7).

Tabelle 6: Klinische Langzeitergebnisse nach Nachsorgeuntersuchung bei ZSM-Patienten mit unilateralem OP-Zugang

Dekompression via unilateralem Zugang +UCT						
	Laminotomie (n=30)			Hemilaminektomie (n=20)		
	Präop.	FU	p-Wert	Präop.	FU	p-Wert
Durchschnittlicher Spinalkanaldurchmesser anterior-posterior, in mm	8,0 ± 2,0	12,7 ± 4,5	< 0,001	8,1 ± 2,2	11,0 ± 3,0	0,003
Medianer Naganawa Grad	3 (1-3)	0 (0-2)	< 0,001	3 (1-3)	0 (0-2)	<0,001
Reoperation im gleichen Segment, Anzahl in (%)	/	1 (3,3)	/	/	3 (15,0)	/
Reoperation im angrenzenden Segment Anzahl in (%)	/	2 (6,7)	/	/	1 (5,0)	/
Medianer VAS / Nackenschmerzen	4,75 (0-10)	0,25 (0-4)	0,036	2,5 (0-10)	0 (0-4)	0,182
Medianer mJOA	12 (5-18)	13 (8-18)	0,044	12 (8-18)	15 (10-18)	0,050

\*Durchschnittswerte ± SD



Tabelle 7: Klinische Langzeitergebnisse nach Nachsorgeuntersuchung bei ZSM-Patienten mit bilateralem OP-Zugang

Dekompression via bilateralem Zugang			
Laminektomie/ Laminoplastie (n=48)			
	Präop.	FU	p-Wert
Durchschnittlicher Spinalkanaldurchmesser anterior- posterior, in mm	7,3 ± 2,4	10,8 ± 3,1	< 0,001
Medianer Naganawa Grad	3 (2-3)	0 (0-2)	< 0,001
Reoperation im gleichen Segment, Anzahl in (%)	/	0	/
Reoperation im angrenzenden Segment Anzahl in (%)	/	3 (6,3)	/
Medianer VAS	3,25 (0-10)	0,25 (0-7)	0,163
Medianer mJOA	12 (4-17)	13,5 (2-18)	0,012

\*Durchschnittswerte ± SD

#### 4.1.5 Beurteilung von Risikofaktoren

Geschlecht, Alter, Begleiterkrankungen, Symptomatik, Symptombdauer und OP-Art wurden hinsichtlich eines möglichen Zusammenhangs mit Komplikationen und Reoperationsraten sowie Langzeitverbesserungen des mJOA analysiert. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang in uni- und multivariablen Analyseverfahren festgestellt werden, jedoch wurde der Zusammenhang zwischen einem erhöhten BMI und einer geringeren Verbesserung des mJOA nach der Langzeituntersuchung deutlich ( $r = 0,293$ ;  $p = 0,003$ ).

## 4.2 Ergebnisse des Patientenkollektivs TSS

### 4.2.1 Demographische Ergebnisse

#### **Patientencharakteristika**

Die Gesamtzahl der TSS-Patienten lag bei 28. 19 Patienten wurden über einen unilateralen Zugang operiert. Darunter befanden sich 6 Männer und 13 Frauen. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 34,5 Jahre alt und der älteste 81,7 Jahre. Das Verhältnis von Männern zu Frauen lag bei 1:2,2.

9 Patienten wurden über einen bilateralen Zugang operiert. Darunter befanden sich 6 Männer und 3 Frauen. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 40,6 Jahre alt und der älteste 85,8. Das Verhältnis von Männern zu Frauen lag bei 2:1 (s. Tabelle 8).

*Tabelle 8: Alter und Geschlecht der TSS-Patienten*

	Dekompression via		p-Wert
	Zugang unilateral (n=19)	Zugang bilateral (n=9)	
Geschlecht, männlich/ weiblich	6 / 13	6 / 3	0,091
Medianalter bei der 1. Operation, in Jahren (Altersgruppe)	70,2 (34,5- 81,7)	70,7 (40,6- 85,8)	0,694

\*Durchschnittswerte  $\pm$  SD

#### **Symptombdauer und präoperative Symptomatik**

Die durchschnittliche Symptombdauer bis zum Zeitpunkt der 1. Operation lag bei  $7,6 \pm 12,5$  Jahren. Von 28 Patienten litten 17 Patienten (60,7%) unter Ataxie, 14 Patienten (50%) gaben Sensibilitätsstörungen an, bei 11 Patienten (39,3%) bestand eine Parese, 6 Patienten (21,4%) gaben Schmerzen an und bei 3 Patienten (10,7%) bestand eine Blasen- Mastdarmstörung (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Symptombdauer und präoperative Symptomatik der TSS-Patienten

	Dekompression via		p-Wert
	Zugang unilateral (n=19)	Zugang bilateral (n=9)	
Durchschnittliche Symptombdauer bei der 1. Operation, in Jahren	7,6 ± 9,5	7,6 ± 15,6	0,998
Präoperative Symptomatik Anzahl in (%)			
Ataxie	10 (52,6)	7 (77,8)	0,530
Sensibilitätsstörung	9 (47,4)	5 (55,6)	0,813
Parese	6 (31,6)	5 (55,6)	0,530
Schmerzen	5 (26,3)	1 (11,1)	0,747
Vegetative Symptomatik	2 (10,2)	1 (11,1)	0,479

\*Durchschnittswerte ± SD

### Begleiterkrankungen

Von insgesamt 28 Patienten lag bei 12 Patienten (42,8%) eine kardiovaskuläre Erkrankung vor, bei 6 Patienten (21,4%) lag ein Diabetes mellitus vor, 7 Patienten (25,0%) wiesen in ihrer Vorgeschichte einen chronischen Nikotinabusus auf und 1 Patient (3,6%) war adipös (s. Tabelle 10).

In Bezug auf die demographischen Ergebnisse, die Symptombdauer und präoperative Symptomatik, sowie die Begleiterkrankungen wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Patienten, die über einen unilateralen Zugang zum Spinalkanal gegenüber den Patienten, die über einen bilateralen Zugang zum Spinalkanal operiert wurden, festgestellt.

Tabelle 10: Begleiterkrankungen der TSS-Patienten

	Dekompression via		p-Wert
	Zugang unilateral (n=19)	Zugang bilateral (n=9)	
Begleiterkrankung, Anzahl in (%)			
Kardiovaskuläre Erkrankung	9 (47,4)	3 (33,3)	0,453
Diabetes mellitus	5 (26,3)	1 (11,1)	0,189
Adipositas	1 (5,3)	0 (0,0)	1,000
Nikotinabusus	5 (26,3)	2 (2,22)	0,915

#### 4.2.2 Radiologische Ergebnisse

##### Höhe der Stenose

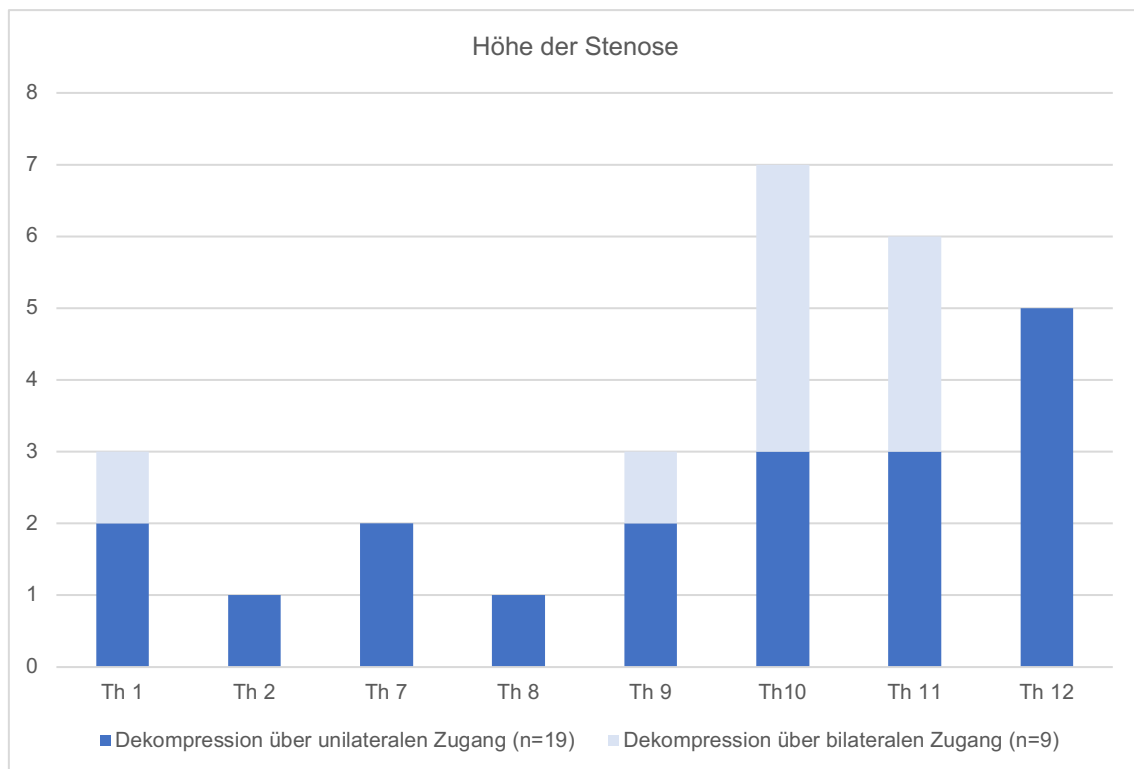


Abbildung 7: Höhe der Stenose und gewähltes operatives Verfahren

27 Patienten wiesen eine Stenose auf einem Segment auf und nur ein Patient wies eine Stenose auf zwei Segmenten auf. 64,3% der Stenosen befanden sich zwischen den Segmenten Th10-12, 21,4% der Stenosen zwischen den Segmenten Th7-Th9 und 14,2% der Stenosen zwischen Th1-2. Insgesamt lagen 75% der Stenosen im distalen Drittel der Brustwirbelsäule (s. Abbildung 3).

### Pathologie der Stenose

In allen Fällen bestand eine dorsale Kompression des Rückenmarks, die entweder durch eine Hypertrophie des Ligamentum flavum und/oder eine Hypertrophie und osteophytäre Anbauten im Bereich der Facettengelenke verursacht wurde.

Der Spinalkanal von einem Patienten wurde durch eine isolierte Facettengelenkszyste eingeengt. Bei keinem Patienten wurde eine Ossifikation des hinteren Längsbandes (OPLL) festgestellt (s. Tabelle 11).

Tabelle 11: Pathologie der Stenose bei TSS-Patienten

	Dekompression via		p-Wert
	Zugang unilateral (n=19)	Zugang bilateral (n=9)	
Isolierte dorsale Rückenmarkskompression aufgrund einer Degeneration des Ligamentum flavum			
Überwiegend knöchern (d.h OLF)	2 (10,5)	1 (11,1)	0,259
Überwiegend ligamentär	3 (15,8)	1 (11,1)	
Kombiniert knöchern und ligamentär	3 (15,8)	4 (44,5)	
Überwiegende dorsale Kompression aufgrund einer Degeneration des Ligamentum flavum und einem Bandscheibenprolaps	10 (52,6)	3 (33,3)	
Isolierte Facettengelenkszyste	1 (5,3)	0	

Aufgrund bestehender Urheberrechtsrestriktionen kann Abbildung 8 der Originalpublikation nicht abgedruckt werden und es wird auf die Originalpublikation verwiesen:

Siller S, Pannenbaecker L, Tonn JC, Zausinger S: Surgery of degenerative thoracic spinal stenosis - long-term outcome with quality-of-life after posterior decompression via an uni- or bilateral approach. *Acta Neurochir.* 2020;162(2):317-325.

*Abbildung 8: MRT Aufnahmen vor und nach Dekompression*

Abbildung 4 zeigt präoperative und postoperative T2-gewichtete MRT-Aufnahmen im Axial- und Sagittalschnitt. A) zeigt eine TSS verursacht durch ein linksbetontes hypertrophes Ligamentum flavum in Kombination mit einem Bandscheibenprolaps (Pfeil); B) zeigt den Zustand nach ausreichender Dekompression durch Hemilaminotomie+UCT links; C) zeigt eine symmetrische Einengung des Spinalkanals durch ein hypertrophes Ligamentum flavum beidseits (Pfeil); D) zeigt den Zustand nach ausreichender Dekompression durch eine Laminektomie.

### 4.2.3 Chirurgische Ergebnisse

Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden, wiesen einen etwas geringeren durchschnittlichen intraoperativen Blutverlust und eine kürzere durchschnittliche OP-Dauer auf, als Patienten die über einen bilateralen Zugang operiert wurden ( $131 \pm 40$  min. ggb.  $164 \pm 80$  min.;  $205 \pm 214$  ml ggb.  $261 \pm 365$  ml). Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer war in beiden Gruppen ähnlich ( $10 \pm 6$  Tage). Es wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ersichtlich.

Im Gegensatz zu den Patienten, die über einen bilateralen Zugang operiert wurden, war bei zwei Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden, eine Reoperation erforderlich. Ein Patient wurde aufgrund einer Wundinfektion und ein anderer Patient aufgrund einer epiduralen Blutung erneut operiert (s. Tabelle 12).

*Tabelle 12: OP-Daten und Komplikationen bei TSS-Patienten*

	Dekompression via		p-Wert
	Zugang unilateral (n=19)	Zugang bilateral (n=9)	
Durchschnittliche OP-Dauer, in min	$131 \pm 40$	$164 \pm 80$	0,161
Durchschnittlicher intraoperativer Blutverlust, in ml	$205 \pm 214$	$261 \pm 365$	0,609
Durchschnittliche Aufenthaltsdauer, in Tagen	$10,1 \pm 6,4$	$9,9 \pm 5,6$	0,948
Komplikationen, Anzahl	1 (Epidurale Blutung) 1 (Wundinfektion)	0	1,000

\*Durchschnittswerte  $\pm$  SD

### 4.2.4 OP-Erfolg und Langzeitergebnisse

Bei allen Patienten waren die vollständigen präoperativen und patientenbezogenen Langzeitergebnisse für die Auswertung des mJOA, des VAS und des Barthel-Index vorhanden. Für die fragebogenbasierte Auswertung

des SF-36v2 und des NDI lagen zum Zeitpunkt der letzten Nachsorgeuntersuchung die Daten von 53% (10/19) der Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden und die Daten von 67% (6/9) der Patienten, die über einen bilateralen Zugang operiert wurden, vor. Hinsichtlich den patientenbezogenen Langzeitergebnissen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen.

Unabhängig von der operativen Methode belegten postoperative MRT-Aufnahmen bei allen Patienten eine ausreichende Dekompression des Rückenmarks. Der mediane präoperative Naganawa Grad lag bei 3, wohingegen der mediane postoperative Naganawa Grad bei 0 lag.

Verbesserungen ergaben sich ebenfalls für den VAS und den mJOA, unabhängig von der angewendeten Operation. Da der mediane mJOA jeweils um 2 Punkte bei der letzten Kontrolluntersuchung in beiden Gruppen anstieg, erfüllt dieser die Merkmale der MCID (minimally clinically important difference) (Tetreault et al., 2015b).

Hinsichtlich der Langzeit-Lebensqualität zeigten sich auch hier zwischen beiden Gruppen keine wesentlichen Unterschiede. Hinsichtlich der Beurteilung der grundlegenden Alltagsfunktionen zeigte sich eine deutliche Verbesserung. Dabei ergab sich ein medianer Barthel-Index von 100 in beiden Gruppen.

In beiden Gruppen ergab sich eine durchschnittliche Verbesserung des ODI (20,9 ggb. 39,2) und des SF-36 MCS (8,9 ggb. 22,0). Diese waren jeweils größer als der Standardfehler (SEM) und erfüllten ebenfalls die Merkmale der MCID (Draak et al., 2019).

Ein Patient wurde aufgrund persistierender Beschwerden und bestehender Stenose (Naganawa Grad 2) nach einem Monat erneut operiert (s. Tabelle 13).



Tabelle 13: Klinische Langzeitergebnisse nach Nachsorgeuntersuchung bei TSS-Patienten

	Dekompression via					
	Zugang unilateral (n=19)			Zugang bilateral (n=9)		
	Präop.	Postop.	p-Wert	Präop.	Postop.	p-Wert
Medianer Naganawa Grad	2 (3-1)	0 (0-2)	0,003	3 (1-3)	0 (0-1)	0,010
Medianer VAS	7 (0-9)	2 (0-7)	0,038	5 (0-10)	1 (0-2)	0,035
Medianer mJOA	14 (9-15)	16 (11-18)	0,031	14 (8-18)	16 (11-18)	0,011
Durchschnittlicher ODI	40,2 ± 13,0	19,3 ± 12,9	0,003	54,5 ± 23,6	15,3 ± 23,6	0,003
Durchschnittlicher SF-36 MCS	37,6 ± 6,7	46,5 ± 10,0	0,032	33,6 ± 14,1	55,6 ± 4,4	0,021

\*Durchschnittswerte ± SD

#### 4.2.5 Beurteilung von Risikofaktoren

Geschlecht, Alter bei der 1. Operation, Symptombdauer, Begleiterkrankungen, Eigenschaften der Stenose und OP-Art wurden hinsichtlich eines möglichen Zusammenhangs mit Komplikationen und Reoperationsraten analysiert, jedoch konnte kein signifikanter Zusammenhang in uni- und multivariaten Analyseverfahren festgestellt werden.

## 5 Diskussion

In der hier vorliegenden Studie wurde eine retrospektive Analyse an 126 Patienten durchgeführt, die aufgrund einer zervikalen- oder thorakalen Spinalkanalstenose zwischen November 2012 bis April 2019 an der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik des Klinikums der Universität München (LMU) (Direktor: Prof. Dr. med. Jörg-Christian Tonn) operativ versorgt wurden.

Die Ergebnisse der ZSM-Patienten und der TSS- Patienten werden getrennt voneinander betrachtet.

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse der ZSM-Patienten Fallserie

Die Hemilaminektomie ist, durch ihren unilateralen Zugang zum Spinalkanal in der Kombination mit einer bilateralen Dekompression des Myelons durch „undercutting“ Verfahren, eine geringer invasive Methode (Bu et al., 2016, Karademir et al., 2017, Ren et al., 2015). Mögliche Risiken einer langfristigen Instabilität sind jedoch dennoch insbesondere in Kombination mit einer Facettektomie gegeben (Tetreault et al., 2015b). Studien zu der degenerativen zervikalen Spinalkanalstenose belegen, dass es nach einer bilateralen Dekompression durch Laminektomie oder Laminoplastie häufig zu einer Atrophie der paraspinalen Muskulatur und postoperativ zu chronischen Schmerzsyndromen kommen kann. Zudem birgt der Einsatz von Implantaten zur Stabilisierung der Wirbelsäule ein zusätzliches Risiko (Ashana et al., 2017, Della Pepa et al., 2014, Ghogawala et al., 2011, McAllister et al., 2012, Sihvonen et al., 1993). Um zugangsbedingte Risiken und deren potentielle negative Folgen zu vermeiden oder zu mindern, werden zunehmend unilaterale Zugänge zum Spinalkanal durchgeführt.

In dieser Doktorarbeit berichten wir über eine neuartige, nochmalig geringer invasive Laminotomietechnik als alternativen unilateralen Ansatz zur Hemilaminektomie. In der Literatur wurde mehrfach über minimalinvasive Laminotomieverfahren im Zusammenhang mit Eingriffen an der Lendenwirbelsäule berichtet (Levy et al., 2012). Jedoch fehlt bisher in Publikationen, die über minimalinvasive unilaterale dorsale Verfahren in der Behandlung von degenerativen Spinalkanalstenosen der Halswirbelsäule berichten, eine Beschreibung von Laminotomieverfahren im Vergleich zu

Hemilaminektomie oder Laminoplastie (Karademir et al., 2017, Mielke et al., 2015, Ren et al., 2015).

Patienten mit unilateraler Symptomatik und einer Kompression des Myelons durch eine Hypertrophie des Ligamentum flavum ohne zusätzliche ossäre Kompressionspathologie wurden über den neuartigen minimalinvasiven Zugang operiert. Im Gegensatz dazu wurde eine Hemilaminektomie bei den Patienten durchgeführt, die eine unilaterale Symptomatik aufwiesen und die Kompression des Myelons durch eine Kombination von Bandhypertrophie und ossärer Verengung des Spinalkanals verursacht wurde. Eine Laminektomie oder Laminoplastik wurde bei Patienten mit zirkulärer Einengung des Spinalkanals durch ossäre und ligamentäre Pathologien durchgeführt. Das minimalinvasive Laminotomieverfahren führte, wie die Hemilaminektomie bzw. Laminektomie/Laminoplastik, zu einer effektiven postoperativen Vergrößerung des Wirbelkanals und einer Verbesserung des mJOA nach der Langzeituntersuchung. Ein Vorteil des minimalinvasiveren Verfahrens ist die deutliche Verbesserung der postoperativen Nackenschmerzen.

Aus der Gesamtkohorte von 98 Patienten mit einer dorsalen Wirbelkanalverengung kamen 31% der Patienten (30/98) für eine minimalinvasive Laminotomie und 20% der Patienten (20/98) für eine Hemilaminektomie in Frage, während bei 49% der Patienten (48/98) eine zirkuläre Spinalkanalstenose vorlag und eine beidseitige chirurgische Dekompression erforderte. Die Patientencharakteristika hinsichtlich des Geschlechts (m:w = 1,4:1), des mittleren Alters (73 Jahre), der mittleren Symptombdauer (ca. 15 Monate), der klinischen Symptomatik, wie z.B. Ataxie (69%) und sensorische Veränderungen (57%), waren vergleichbar mit den Ergebnissen der aktuellen Literatur (Bu et al., 2016, Karademir et al., 2017, Ren et al., 2015).

Die radiologischen Charakteristika der Spinalkanalstenosen aus unserer Studienkohorte bezüglich des mittleren Spinalkanaldurchmessers in anterior-posteriorer Richtung ( $7,7 \pm 2,2$  mm) und den am häufigsten betroffenen Segmenten (C3- bis C6) entsprechen ebenfalls den Daten der aktuellen Literatur (Bu et al., 2016, Karademir et al., 2017, Vyas et al., 2004). Die genannten Ergebnisse belegen die Repräsentativität der Studienergebnisse. Sowohl Patientencharakteristika bei der Erstuntersuchung als auch die Ergebnisse der

Bildgebung zwischen den drei chirurgischen Gruppen unserer Studienkohorte unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, so dass die statistische Vergleichbarkeit der Outcome-Daten gegeben war.

Hinsichtlich der postoperativen Bildgebung konnten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Gruppen festgestellt werden. Der postoperative Mittelwert des anterior-posterioren Spinalkanaldurchmessers der gesamten Kohorte lag bei  $11,4 \pm 3,6$  mm und der mediane postoperative Naganawa-Grad lag bei 0. Diese Werte belegen eine ausreichende Dekompression in allen Fällen. Die mittlere anterior-posteriore Gesamtexpansionsrate des Spinalkanals lag bei  $42,9 (\pm 11,4)$  % und ist somit vergleichbar mit Ergebnissen aus früheren Publikationen (Bu et al., 2016, Ren et al., 2015). Der intraoperative Blutverlust war bei den Patienten, die sich einem Eingriff mit unilateralem Zugang unterzogen, etwas geringer als den Patienten, die sich einem Eingriff mit bilateralem Zugang unterzogen. Aufgrund der geringen Gesamtstichprobengröße wurde die statistische Signifikanz verfehlt. Zudem gab es keine Unterschiede zu der mittleren Operationszeit in beiden Gruppen.

Das funktionelle Ergebnis in Bezug auf den mJOA hat sich bei den Patienten nach Dekompression deutlich verbessert und ist bis zu der Langzeituntersuchung von 12 auf 14 angestiegen. Damit wurden in unserer Kohorte ebenfalls die Merkmale der MCID bezüglich des mJOA erfüllt und stimmen mit den Ergebnissen einer aus einer Studie zu der degenerativen zervikalen Myelopathie von Tetreault. et al. überein (Tetreault et al., 2015b).

Nach der Langzeituntersuchung wurde, unabhängig von der Art des operativen Zugangs, eine Verbesserung der myelopathischen Symptome beobachtet, wohingegen die Abnahme der Nackenschmerzen in den Hemilaminektomie- und Laminektomie-/Laminoplastik-Gruppen nicht signifikant war. Beim letzten Follow-up fiel der mediane präoperative VAS von 4 auf 0,25. Einzig bei den Patienten aus der Gruppe mit dem minimalinvasiven Laminotomieverfahren kam es postoperativ zu einer deutlichen Abnahme der Nackenschmerzen. Dies könnte die Vorteile des minimalinvasiveren Verfahrens verdeutlichen, da bei diesem Eingriff auf eine vollständige Ablösung der paraspinalen Muskulatur verzichtet wird. Die Ergebnisse hinsichtlich der postoperativen Lebensqualität, dem SF-36v2 und dem NDI waren in allen Gruppen ähnlich.

Insgesamt war der Anteil an Patienten, die während des Langzeit-Follow-ups in benachbarten Segmenten erneut operiert werden mussten in allen Gruppen ähnlich hoch (Gesamtrate: 6,1%). Die Notwendigkeit einer Reoperation im gleichen Segment trat nur in den Gruppen mit einseitigem chirurgischen Zugang während des Follow-ups auf (1 Patient in der Laminotomiegruppe und 3 Patienten in der Hemilaminektomiegruppe). Dabei lag die mittlere Zeit zwischen erster Operation und Reoperation bei  $6,2 \pm 4,9$  Monaten. Jeweils ein Patient aus der Laminotomiegruppe und der Hemilaminektomiegruppe wurden aufgrund eines Bandscheibenvorfalles nach 1 bzw. 12 Monaten erneut operiert. Ein Patient aus der Hemilaminektomiegruppe wurde 4 Monate nach der 1. Operation aufgrund einer persistierenden ligamentären Rückenmarkskompression auf der kontralateralen Seite nach einem unzureichenden „Undercutting“ erneut operiert. Ein anderer Patient aus der Hemilaminektomiegruppe wurde nach 8 Monaten aufgrund starker Narbenbildung und Rezidivstenose auf der gleichen Seite erneut operiert.

Aufgrund der geringen Gesamtstichprobengröße ist es schwer zu beurteilen, ob die höhere Reoperationsrate durch die Rezidivstenosen aus den unilateralen Verfahren oder durch Zufall bzw. durch den Nachteil des jeweiligen Verfahrens bedingt ist. Mit Hilfe der Regressionsanalyse konnte allerdings kein Zusammenhang zwischen der Wahl des chirurgischen Vorgehens und einem möglichen Risikofaktor für höhere Komplikations- oder Reoperationsraten festgestellt werden. Um ein kontralaterales Rezidiv der Stenose zu vermeiden, sollte während des „Undercutting“-Verfahrens besonders auf eine vollständige Exzision des kontralateralen Ligamentum flavum geachtet werden. Des Weiteren sollte die Blutung nach der Dekompression sorgfältig kontrolliert werden, damit sich kein kompressives Narbengewebe und dadurch eine erneute Stenose bildet.

Insgesamt musste kein Patient aufgrund einer sekundären Instabilität erneut operiert werden. Die hier vorliegende retrospektive Fallserie war primär nicht dazu gedacht Unterschiede im Risiko für eine langfristige postoperative Instabilität zwischen den drei Operationsgruppen im Detail zu erkennen. Sie hat nicht zum Ziel, mögliche Risikofaktoren für eine postoperative Instabilität zwischen den drei Gruppen im Detail darzustellen.

Es ist nach wie vor umstritten, welche potentiellen Risikofaktoren nach einer ZSM-Operation zu einem schlechteren Langzeitergebnis führen. In früheren Publikationen wurden ein fortgeschrittenes Alter, eine langandauernde Symptomatik und ein langjährig bestehender Diabetes mellitus in Zusammenhang mit schlechten Langzeitergebnissen und höheren Komplikationsraten in Verbindung gebracht (Liu et al., 2017, Machino et al., 2014, Park et al., 2016, Zhang et al., 2016).

Neben potentiellen Risikofaktoren wie Übergewicht und Adipositas ist das Rauchen ein wesentlicher negativer Prädiktor der als Risikofaktor einzustufen ist (An et al., 1994, Kostova et al., 2001). Die Intensität des Rauchens, der Zeitraum des Rauchens und ein Zigarettenkonsum von mehr als 20 Zigaretten pro Tag erhöhen das Risiko einer Wirbelsäulenerkrankung (Kostova et al., 2001). In einer schwedischen Studie zu prädiktiven Faktoren nach anteriorer zervikaler Dekompression und Fusion war der wichtigste präoperative Faktor für ein besseres Outcome, vor der Operation Nichtraucher zu sein (Peolsson et al., 2006).

In unserer ZSM-Patientenkohorte war ein erhöhter BMI ein schwacher, aber statistisch signifikanter prognostischer Risikofaktor für eine geringere Verbesserung des mJOA nach Dekompression und Follow-up. Mit einer Prävalenz von mehr als 10% in der Bevölkerung bei den über 55 jährigen ist die ZSM damit weltweit die häufigste Ursache für Rückenmarksverletzungen bei älteren Patienten (Iyer et al., 2016, Tetreault et al., 2015a). Bei der älteren Bevölkerung wird eine hohe Rate an Übergewichtigen ( $\text{BMI} \geq 25 \text{ kg/m}^2$ ) und adipösen ( $\text{BMI} \geq 30 \text{ kg/m}^2$ ) Menschen beobachtet. Die maximale Rate liegt bei 45% der Menschen im Alter zwischen 50 und 70 Jahren (Chooi et al., 2019). Entsprechend lag die Rate der Übergewichtigen und adipösen Patienten dieser Studienkohorte im Alter zwischen 50 und 70 Jahren bei 52%. Frühere Studien im Zusammenhang mit Risikofaktoren und einem geringeren Outcome in großen gemischten Patientenkohorten, die sich einer anterioren und/oder posterioren Dekompression bei uni- oder multisegmentaler ZSM unterzogen, ergaben dass ein höherer BMI keine signifikante prognostische Relevanz hat (Evaniew et al., 2020, Zhang et al., 2016, Zika et al., 2020). In dieser Studie konnte ein Zusammenhang zwischen einem höheren BMI und einem schlechten Outcome

im Hinblick auf die Abnahme myelopathischer Symptome bei ZSM-Patienten mit Pathologien, die eine dorsale Dekompression erfordern, beobachtet werden.

Angesichts der hohen Vergleichbarkeit und der ähnlichen Ergebnisse in unseren drei Operationsgruppen kommen wir zu dem Schluss, dass ein individueller Zugang im Hinblick auf die ursächliche Pathologie gewählt werden sollte, um einen möglichst gering invasiven Eingriff und eine damit einher gehende reduzierte Belastung der Patienten zu erreichen. Das Konzept eines minimalinvasiveren Zugangs via Laminotomie bietet zufriedenstellende Ergebnisse im Hinblick auf das neurologische Ergebnis und die Verbesserung der Lebensqualität in der Langzeituntersuchung von ZSM-Patienten.

#### 5.1.1 Limitationen

Abschließend sollte auf die Einschränkungen der vorliegenden Studie eingegangen werden. Diese sind hauptsächlich auf das retrospektive Studiendesign zurückzuführen. Aufgrund der geringen Gesamtstichprobengröße könnten mögliche Effekte, insbesondere in der Beurteilung der postoperativen Instabilitäten, nicht aussagekräftig dargestellt und beurteilt werden.

#### 5.2 Diskussion der Ergebnisse der TSS-Patienten-Fallserie

Im Vergleich zu der zervikalen und lumbalen Spinalkanalstenose ist die TSS eine seltene Erkrankung. Größere Fallserien in Bezug auf Inzidenz, Pathologie, Behandlungsmethoden, potentielle Risikofaktoren und Langzeitergebnis sind ausschließlich für asiatische Populationen verfügbar (He et al., 2014, Hou et al., 2016). In dieser Arbeit präsentieren wir eine der ersten größeren europäischen TSS-Fallserien.

Im Hinblick auf die Symptomatik, wie z.B. Ataxie (ca. 61%) und sensorische Veränderungen (ca. 46%), stimmen die klinischen Ergebnisse aus unserer Fallserie mit den Ergebnissen aus asiatischen Kohorten überein (Aizawa et al., 2007, Hou et al., 2016, Onishi et al., 2016). Die TSS ist die wohl wichtigste Differentialdiagnose der zervikalen spondylotischen Myelopathie. 4% aller Patienten mit einer degenerativen spondylotischen Myelopathie wurden aufgrund einer TSS operiert, jedoch konnten keine eindeutigen Risikofaktoren hinsichtlich der Patientencharakteristika, der Symptomatik und der Begleiterkrankungen für TSS-Patienten bestimmt werden. In asiatischen Fallserien wird von einer

Dominanz des männlichen Geschlechts berichtet, wohingegen in unserer europäischen Fallserie ein Verhältnis Frauen zu Männern von ca. 1,3:1 vorliegt (Aizawa et al., 2007, Hou et al., 2016, Shiokawa et al., 2001, Zhang et al., 2010).

Unsere Befunde untermauern Erkenntnisse in der Literatur, dass die untere Brustwirbelsäule der Bereich mit den häufigsten Stenosen ist. Allerdings wurden in Bezug auf die Ätiologie einige Unterschiede deutlich. In asiatischen Populationen ist die OLF die häufigste Ursache einer TSS (bis zu 70%), gefolgt von Bandscheibenvorfällen und OPLL (Aizawa et al., 2006, Hou et al., 2016). In unserer Kohorte war die isolierte OLF nur in 11% der Fälle die Hauptursache für eine TSS. Bei mehr als 80% der Patienten waren die Hypertrophie des Ligamentum flavum und davon in der Hälfte der Fälle zusätzlich ein Bandscheibenvorfall die Hauptursache einer TSS. Im Vergleich zu asiatischen Populationen wurde in unserer Kohorte kein OPLL-Fall beschrieben. Ein Grund dafür könnte das deutlich höhere Alter unserer Patienten von 70,5 Jahren sein. Das mittlere Patientenalter in asiatischen Populationen liegt zwischen 50 und 60 Jahren (Aizawa et al., 2007, He et al., 2014, Hou et al., 2016). Von einer Lateralisierung bzw. einseitigen Symptomatik wurde in asiatischen Kohorten nicht berichtet, dabei bestand diese bei ca. 2/3 unserer Patienten. Die Anzahl von Stenosen auf mehreren Segmenten war in unser Fallserie im Vergleich zu den asiatischen Fallserien deutlich geringer (Aizawa et al., 2007, Chang et al., 2001).

Aufgrund des hohen Anteils an Patienten, bei denen eine Hypertrophie bzw. Ossifikation des Ligamentum flavum als Ursache für die dorsale Kompression des Myelons vorliegt, wurde entsprechend ein dorsaler Zugang für die Dekompression gewählt. In unserem Patientengut bestand in Anbetracht der dominierend dorsalen Pathologien keine zwingende Indikation für anteriore oder kombinierte anteriore-posteriore Verfahren, wie sie in einigen Fallserien zu OPLL und Bandscheibenvorfällen beschrieben wurden (Aizawa et al., 2007, Chang et al., 2001, Fujimura et al., 1997). Da sich die Kompression in 66% der Fälle einseitig manifestierte, wurde bei diesen Patienten ein unilateraler dorsaler Zugang gewählt. Wie im ersten Teil dieser Promotionsarbeit beschrieben hat sich bei geeigneten Patienten das Konzept eines unilateralen Zugangs zur Wirbelsäule via EILF oder Hemilaminektomie in Kombination mit einer bilateralen Dekompression des Myelons und der Nervenwurzeln über „Undercutting“-



Verfahren bewährt. Dieses Verfahren könnte gegenüber der Laminektomie und Laminoplastie einige Vorteile erzielen. Die Destabilisierung der paraspinalen Muskulatur und der Einsatz von Implantaten könnte vermieden und die Operationszeit sowie der intraoperative Blutverlust reduziert werden (Bu et al., 2016, Karademir et al., 2017, Mielke et al., 2015, Ren et al., 2015). Während dieses Konzept bei den Patienten mit einseitiger Symptomatik angewendet wurde, wurden bei den übrigen Patienten aus der TSS-Fallserie eine Laminektomie durchgeführt.

In den postoperativen MRT-Aufnahmen wurden hinsichtlich des Spinalkanaldurchmessers in anterior-posteriorer Richtung und des Liquorraumdurchmessers keine Unterschiede zwischen den Patienten mit uni- oder bilateralem Zugang deutlich. In allen Fällen war die Dekompression erfolgreich. Dieses Ergebnis spiegelt sich in dem durchschnittlichen postoperativen Naganawa-Grad von 0 wieder.

Wie vermutet, waren der intraoperative Blutverlust und die Operationszeit bei Patienten, die über einen unilateralen Zugang operiert wurden, geringer. Aufgrund der geringen Stichprobengröße wurde kein signifikanter Unterschied deutlich. Trotz einiger Vorteile traten postoperative Komplikationen (epidurale Blutung und Wundinfektion) und eine erneute Stenose jeweils bei einem Patienten der unilateralen Gruppe auf. Diese höheren Komplikations- und Rezidivraten sind allerdings im Hinblick auf die geringe Stichprobengröße nicht eindeutig auf den unilateralen Zugang zurückzuführen. Dies belegte auch die Regressionsanalyse. Zuletzt benötigte kein Patient eine Fusionsoperation aufgrund einer sekundären Instabilität bei der Langzeituntersuchung. Die postoperative Symptombefreiheit und das Ergebnis nach Dekompression waren in beiden Gruppen ähnlich.

Sowohl die Schmerzen als auch das funktionelle Ergebnis in Bezug auf den mJOA haben sich bei den Patienten nach Dekompression bis hin zu der Langzeituntersuchung stetig verbessert. Bei 3 von 4 Patienten zeigten sich deutliche Verbesserungen des neurologischen Status bzw. keine weitere Verschlechterung. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Beobachtungen in größeren asiatischen TSS-Fallserien (Aizawa et al., 2007, Onishi et al., 2016).

Obwohl die Lebensqualität in früheren Studien noch nie allein bewertet wurde, konnten in dieser Doktorarbeit signifikante Verbesserungen in verschiedenen Aspekten der Lebensqualität nachgewiesen werden. Die schmerzbedingten Rückenbeschwerden (erfasst anhand des ODI) und die psychische Gesundheit (gemessen durch den SF-36 MCS) haben sich signifikant verbessert und erfüllten somit die Merkmale der MCID (Draak et al., 2019). Die Aktivitäten des täglichen Lebens (gemessen durch den Barthel-Index) und die Patientenzufriedenheit (gemessen durch den PSI) haben sich ebenfalls verbessert.

Es ist nach wie vor umstritten, ob bestimmte Risikofaktoren zu einem schlechteren Ergebnis nach einer Dekompression der thorakalen Myelons führen. In einigen asiatischen Fallserien wird von einem schlechteren Langzeitergebnis berichtet, wenn die Patienten eine lange präoperative Symptombdauer sowie ein präoperativer mJOA  $< 7$  aufwiesen (Aizawa et al., 2007, Chang et al., 2001, Onishi et al., 2016). Keiner der folgenden Parameter: Geschlecht, Alter bei der Erstoperation, Dauer und Art/Ausmaß der Symptome, präoperativer mJOA, Begleiterkrankungen, Charakteristika der Stenose und Art der Operation erwies sich als prognostischer Risikofaktor unserer TSS-Kohorte.

Angesichts der ähnlichen Ergebnisse nach uni- oder bilateraler Dekompression kommen wir zu der Schlussfolgerung, dass ein individueller Zugang im Hinblick auf die ursächliche Pathologie gewählt werden sollte, um einen möglichst minimalinvasiven Eingriff und eine geringe Belastung der Patienten zu erreichen. Das Konzept eines unilateralen Zugangs bietet zufriedenstellende Ergebnisse im Hinblick auf das neurologische Ergebnis und die Verbesserung der Lebensqualität in der Langzeituntersuchung.

### 5.2.1 Limitationen

Abschließend sollte auf die Einschränkungen der vorliegenden Studie eingegangen werden. Diese sind hauptsächlich auf das retrospektive Studiendesign zurückzuführen. Aufgrund der geringen Gesamtstichprobengröße könnten mögliche Effekte nicht aussagekräftig dargestellt und beurteilt werden. Die geringe Stichprobengröße ist allerdings auf die Seltenheit einer TSS-Erkrankung zurückzuführen.

## 6 Zusammenfassung

In der uns hier vorliegenden Promotion berichten wir zum ersten Mal über eine ZSM-Fallserie, bei welcher die Patienten mit einer dorsalen Rückenmarkskompression, über einen individuellen chirurgischen Ansatz auf die Pathologie der Kompression zugeschnitten, operiert wurden. Patienten mit einseitigen Beschwerden, bei denen die Kompression allein durch eine Hypertrophie des Ligamentum flavum geschuldet war, wurden mit einer neuartigen minimalinvasiven Laminotomietechnik operiert. Die Hemilaminektomie wurde bei Patienten mit einseitigen Beschwerden und einer Kombination aus Bandhypertrophie und össärer Kompressionspathologie durchgeführt und die Laminektomie/Laminoplastik wurde bei Patienten mit zirkulärer Einengung des Spinalkanals durch össäre und ligamentäre Pathologien durchgeführt. Im Vergleich zu der bilateralen Operationsgruppe führten unilaterale Verfahren zu einer ebenso signifikanten und effektiven postoperativen Erweiterung des Wirbelkanals und zu einer Verbesserung des mJOA-Scores beim Follow-up. Letztendlich könnten unilaterale Verfahren im Gegensatz zu bilateralen Verfahren eine deutlich geringere Belastung der Patienten in der postoperativen und langfristigen Nachsorge bergen.

In dieser Doktorarbeit wurden Daten analysiert, die erstmals zeigen, dass die TSS etwa 4% aller Fälle einer degenerativen Myelopathie ausmacht, die chirurgisch versorgt werden. Im Gegensatz zu früheren publizierten Ergebnissen aus asiatischen Fallserien wurde in unserer Kohorte die TSS vorwiegend bei weiblichen Patienten und älteren Patienten über 60 Jahren gefunden. Die Hypertrophie des Ligamentum flavum und davon in der Hälfte der Fälle zusätzlich ein Bandscheibenvorfall ist die Hauptursache für eine TSS. Etwa 2/3 von den Patienten wiesen eine einseitige Symptomatik bzw. Lateralisierung auf. In Abhängigkeit von der Morphologie der Kompression verbesserten sich sowohl die Symptome als auch die Lebensqualität in der Langzeituntersuchung in beiden Gruppen nach erfolgreicher dorsaler Dekompression gleich.

**Literaturverzeichnis**

Aizawa, T., Sato, T., Sasaki, H., Matsumoto, F., Morozumi, N., Kusakabe, T., Itoi, E., Kokubun, S. Results of surgical treatment for thoracic myelopathy. Minimum 2-year follow-up study in 132 patients. *J Neurosurg Spine*. 7 (2007) 13-20

Aizawa, T., Sato, T., Tanaka, Y., Ozawa, H., Hoshikawa, T., Ishii, Y., Morozumi, N., Ishibashi, K., Kasama, F., Hyodo, H., Murakami, E., Nishihira, T., Kokubun, S. Thoracic myelopathy in Japan: epidemiological retrospective study in Miyagi Prefecture during 15 years. *Tohoku J Exp Med*. 210 (2006) 199-208

An, H.S., Silveri, C.P., Simpson, J.M., File, P., Simmons, C., Simeone, F.A., Balderston, R.A. Comparison of smoking habits between patients with surgically confirmed herniated lumbar and cervical disc disease and controls. *J Spinal Disord*. 7 (1994) 369-373

Arnts, H., Bartels, R.H. Flexible dropped head deformity following laminectomy for cervical spondylotic myelopathy: a case series and review of literature. *Spine J*. 16 (2016) e721-e724

Ashana, A.O., Ajiboye, R.M., Sheppard, W.L., Sharma, A., Kay, A.B., Holly, L.T. Cervical Paraspinal Muscle Atrophy Rates Following Laminoplasty and Laminectomy with Fusion for Cervical Spondylotic Myelopathy. *World Neurosurg*. 107 (2017) 445-450

Barnett, G.H., Hardy, R.W., Jr., Little, J.R., Bay, J.W., Sybert, G.W. Thoracic spinal canal stenosis. *J Neurosurg*. 66 (1987) 338-344

Baron, E.M., Young, W.F. Cervical spondylotic myelopathy: a brief review of its pathophysiology, clinical course, and diagnosis. *Neurosurgery*. 60 (2007) S35-41

Benzel, E.C., Lancon, J., Kesterson, L., Hadden, T. Cervical laminectomy and dentate ligament section for cervical spondylotic myelopathy. *J Spinal Disord*. 4 (1991) 286-295

Boogaarts, H.D., Bartels, R.H. Prevalence of cervical spondylotic myelopathy. *Eur Spine J*. 24 Suppl 2 (2015) 139-141

Brain, W.R., Northfield, D., Wilkinson, M. The neurological manifestations of cervical spondylosis. *Brain*. 75 (1952) 187-225

Broekema, A.E.H., Molenberg, R., Kuijlen, J.M.A., Groen, R.J.M., Reneman, M.F., Soer, R. The Odom Criteria: Validated at Last: A Clinimetric Evaluation in Cervical Spine Surgery. *J Bone Joint Surg Am*. 101 (2019) 1301-1308

Bu, G., Shuang, F., Liu, G., Wu, Y., Hou, S., Ren, D., Shang, W. Efficacy and safety of one-stage selective discectomy combined with expansive hemilaminectomy in the treatment of cervical spondylotic myelopathy. *World Neurosurg*. 94 (2016) 507-512

Chang, U.K., Choe, W.J., Chung, C.K., Kim, H.J. Surgical treatment for thoracic spinal stenosis. *Spinal Cord*. 39 (2001) 362-369

Chen, Z.-q., Sun, C.-g., the Spine Surgery Group of Chinese Orthopedic, A. Clinical Guideline for Treatment of Symptomatic Thoracic Spinal Stenosis. *Orthopaedic Surgery*. 7 (2015) 208-212

Chooi, Y.C., Ding, C., Magkos, F. The epidemiology of obesity. *Metabolism*. 92 (2019) 6-10

Clarke, E., Robinson, P.K. Cervical myelopathy: a complication of cervical spondylosis. *Brain*. 79 (1956) 483-510

Della Pepa, G.M., Roselli, R., La Rocca, G., Spallone, A., Barbagallo, G., Visocchi, M. Laminoplasty is better of laminectomy in cervical stenotic myelopathy: myth or truth? *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 18 (2014) 50-54

Dimar, J.R., 2nd, Bratcher, K.R., Glassman, S.D., Howard, J.M., Carreon, L.Y. Identification and surgical treatment of primary thoracic spinal stenosis. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*. 37 (2008) 564-568

Draak, T.H.P., Greef, B.T.A., Faber, C.G., Merkies, I.S.J. The minimum clinically important difference. Which direction to take. *Eur J Neurol*. 26 (2019) 850-855

Dützmann, S., Fernandez, R., Rosenthal, D. Spinalkanalstenose im Thorakalbereich. Ätiologie, Pathogenese, Diagnostik und Therapie (thoracic spinal stenosis: etiology, pathogenesis, and treatment). *Orthopade*. 48 (2019) 844-848

Emery, S.E. Cervical spondylotic myelopathy: diagnosis and treatment. *J Am Acad Orthop Surg*. 9 (2001) 376-388

Evaniew, N., Cadotte, D.W., Dea, N., Bailey, C.S., Christie, S.D., Fisher, C.G., Paquet, J., Soroceanu, A., Thomas, K.C., Rampersaud, Y.R., Manson, N.A., Johnson, M., Nataraj, A., Hall, H., McIntosh, G., Jacobs, W.B. Clinical predictors of achieving the minimal clinically important difference after surgery for cervical spondylotic myelopathy: an external validation study from the Canadian Spine Outcomes and Research Network. *J Neurosurg Spine*. (2020) 1-9

Fairbank, J.C., Couper, J., Davies, J.B., O'Brien, J.P. The Oswestry low back pain disability questionnaire. *Physiotherapy*. 66 (1980) 271-273

Fehlings, M.G., Ibrahim, A., Tetreault, L., Albanese, V., Alvarado, M., Arnold, P., Barbagallo, G., Bartels, R., Bolger, C., Defino, H., Kale, S., Massicotte, E., Moraes, O., Scerrati, M., Tan, G., Tanaka, M., Toyone, T., Yukawa, Y., Zhou, Q., Zileli, M., Kopjar, B. 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 (Phila Pa 1976)*. 40 (2015) 1322-1328

Fehlings, M.G., Tetreault, L.A., Wilson, J.R., Skelly, A.C. Cervical spondylotic myelopathy: current state of the art and future directions. *Spine (Phila Pa 1976)*. 38 (2013) S1-8

Fujimura, Y., Nishi, Y., Nakamura, M., Toyama, Y., Suzuki, N. Long-term follow-up study of anterior decompression and fusion for thoracic myelopathy resulting from ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spine*. 22 (1997) 305-311

Ghogawala, Z., Martin, B., Benzel, E.C., Dziura, J., Magge, S.N., Abbed, K.M., Bisson, E.F., Shahid, J., Coumans, J.V.C.E., Choudhri, T.F., Steinmetz, M.P., Krishnaney, A.A., King, J.T., Butler, W.E., Barker, F.G., Heary, R.F. Comparative effectiveness of ventral vs dorsal surgery for cervical spondylotic myelopathy. *Neurosurgery*. 68 (2011) 622-630

Harrop, J.S., Naroji, S., Maltenfort, M., Anderson, D.G., Albert, T., Ratliff, J.K., Ponnappan, R.K., Rihn, J.A., Smith, H.E., Hilibrand, A., Sharan, A.D., Vaccaro, A. Cervical myelopathy: a clinical and radiographic evaluation and correlation to cervical spondylotic myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 35 (2010) 620-624

He, B., Yan, L., Xu, Z., Guo, H., Liu, T., Hao, D. Treatment strategies for the surgical complications of thoracic spinal stenosis. A retrospective analysis of two hundred and eighty three cases. *Int Orthop*. 38 (2014) 117-122

Heipertz, W. Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen. In: "Wirbelsäulenerkrankungen: Diagnostik und Therapie", Heipertz, W., Schmitt, E. (Hrsg.) Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1978, 77-86

Herdmann, J., Linzbach, M., Krzan, M., Dvorák, J., Bock, W.J. The European Myelopathy Score. In: Bauer, B.L., Brock, M., Klinger, M., eds. *Cerebellar Infarct. Midline Tumors. Minimally Invasive Endoscopic Neurosurgery (MIEN)*, 1994// 1994 Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 266-268.

Hou, X., Sun, C., Liu, X., Liu, Z., Qi, Q., Guo, Z., Li, W., Zeng, Y., Chen, Z. Clinical features of thoracic spinal stenosis-associated myelopathy. A retrospective analysis of 427 cases. *Clin Spine Surg*. 29 (2016) 86-89

Iyer, A., Azad, T.D., Tharin, S. Cervical Spondylotic Myelopathy. *Clin Spine Surg*. 29 (2016) 408-414

Jaksche, H., Schulz, J. Spätkomplikationen nach operativen Eingriffen an der Halswirbelsäule. *Trauma und Berufskrankheit*. 7 (2005) S277-S280

Joaquim, A.F., Riew, K.D. Management of cervical spine deformity after intradural tumor resection. *Neurosurg Focus*. 39 (2015) E13

Kadanka, Z., Bednarik, J., Novotny, O., Urbanek, I., Dusek, L. Cervical spondylotic myelopathy: conservative versus surgical treatment after 10 years. *Eur Spine J*. 20 (2011) 1533-1538

Kalsi-Ryan, S., Karadimas, S.K., Fehlings, M.G. Cervical spondylotic myelopathy: the clinical phenomenon and the current pathobiology of an increasingly prevalent and devastating disorder. *Neuroscientist*. 19 (2013) 409-421

Kaptain, G.J., Simmons, N.E., Replogle, R.E., Pobereskin, L. Incidence and outcome of kyphotic deformity following laminectomy for cervical spondylotic myelopathy. *J Neurosurg*. 93 (2000) 199-204

Karademir, M., Kucuk, A., Ulutabanca, H., Selcuklu, A., Menku, A., Tucer, B. The comparison of hemilaminectomy and laminoplasty procedures in the surgical treatment of cervical spondylotic myelopathy. *Turk Neurosurg*. 27 (2017) 74-84

Karadimas, S.K., Erwin, W.M., Ely, C.G., Dettori, J.R., Fehlings, M.G. Pathophysiology and natural history of cervical spondylotic myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 38 (2013) S21-36

Klineberg, E. Cervical spondylotic myelopathy: a review of the evidence. *Orthop Clin North Am*. 41 (2010) 193-202

Kostova, V., Koleva, M. Back disorders (low back pain, cervicobrachial and lumbosacral radicular syndromes) and some related risk factors. *J Neurol Sci*. 192 (2001) 17-25

Kranz, P.G., Amrhein, T.J. Imaging Approach to Myelopathy: Acute, Subacute, and Chronic. *Radiol Clin North Am*. 57 (2019) 257-279

Lawrence, B.D., Shamji, M.F., Traynelis, V.C., Yoon, S.T., Rhee, J.M., Chapman, J.R., Brodke, D.S., Fehlings, M.G. Surgical management of degenerative cervical myelopathy: a consensus statement. *Spine (Phila Pa 1976)*. 38 (2013) S171-172

Lebl, D.R., Bono, C.M. Update on the Diagnosis and Management of Cervical Spondylotic Myelopathy. *J Am Acad Orthop Surg*. 23 (2015) 648-660

Levy, R.M., Deer, T.R. Systematic safety review and meta-analysis of procedural experience using percutaneous access to treat symptomatic lumbar spinal stenosis. *Pain Med*. 13 (2012) 1554-1561

Liu, Y., Ban, D.X., Kan, S.L., Cao, T.W., Feng, S.Q. The Impact of Diabetes Mellitus on Patients Undergoing Cervical Spondylotic Myelopathy: A Meta-Analysis. *Eur Neurol*. 77 (2017) 105-112

Ludolph, A.C.e.a. S1-Leitlinie Zervikale spondylotische Myelopathie. In: Deutsche Gesellschaft für Neurologie, Hrsg. Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie. (2017)

MacDowall, A., Skeppholm, M., Robinson, Y., Olerud, C. Validation of the visual analog scale in the cervical spine. *J Neurosurg Spine*. 28 (2018) 227-235

Machino, M., Yukawa, Y., Ito, K., Inoue, T., Kobayakawa, A., Matsumoto, T., Ouchida, J., Tomita, K., Kato, F. Risk factors for poor outcome of cervical laminoplasty for cervical spondylotic myelopathy in patients with diabetes. *J Bone Joint Surg Am*. 96 (2014) 2049-2055

Mahoney, F.I., Barthel, D.W. Functional evaluation. The Barthel Index. *Md State Med J*. 14 (1965) 61-65

Matsuoka, Y., Endo, K., Nishimura, H., Suzuki, H., Sawaji, Y., Takamatsu, T., Seki, T., Murata, K., Konishi, T., Yamamoto, K. Cervical Kyphotic Deformity after Laminoplasty in Patients with Cervical Ossification of Posterior Longitudinal Ligament with Normal Sagittal Spinal Alignment. *Spine Surg Relat Res*. 2 (2018) 210-214

McAllister, B.D., Rebholz, B.J., Wang, J.C. Is posterior fusion necessary with laminectomy in the cervical spine? *Surg Neurol Int*. 3 (2012) S225-231

McCormick, J.R., Sama, A.J., Schiller, N.C., Butler, A.J., Donnally, C.J., 3<sup>rd</sup> Cervical Spondylotic Myelopathy: A Guide to Diagnosis and Management. *J Am Board Fam Med.* 33 (2020) 303-313

Mielke, D., Rohde, V. Bilateral spinal canal decompression via hemilaminectomy in cervical spondylotic myelopathy. *Acta Neurochir.* 157 (2015) 1813-1817

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

Naganawa, T., Miyamoto, K., Ogura, H., Suzuki, N., Shimizu, K. Comparison of magnetic resonance imaging and computed tomogram-myelography for evaluation of cross sections of cervical spinal morphology. *Spine.* 36 (2011) 50-56

Nouri, A., Tetreault, L., Singh, A., Karadimas, S.K., Fehlings, M.G. Degenerative Cervical Myelopathy: Epidemiology, Genetics, and Pathogenesis. *Spine (Phila Pa 1976).* 40 (2015) E675-693

Odom, G.L., Finney, W., Woodhall, B. CERVICAL DISK LESIONS. *Journal of the American Medical Association.* 166 (1958) 23-28

Onishi, E., Yasuda, T., Yamamoto, H., Iwaki, K., Ota, S. Outcomes of surgical treatment for thoracic myelopathy. A single-institutional study of 73 patients. *Spine.* 41 (2016)

Osman, N.S., Cheung, Z.B., Hussain, A.K., Phan, K., Arvind, V., Vig, K.S., Vargas, L., Kim, J.S., Cho, S.K. Outcomes and Complications Following Laminectomy Alone for Thoracic Myelopathy due to Ossified Ligamentum Flavum: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Spine (Phila Pa 1976).* 43 (2018) E842-e848

Palumbo, M.A., Hilibrand, A.S., Hart, R.A., Bohlman, H.H. Surgical treatment of thoracic spinal stenosis: a 2- to 9-year follow-up. *Spine (Phila Pa 1976).* 26 (2001) 558-566

Park, M.S., Ju, Y.S., Moon, S.H., Kim, T.H., Oh, J.K., Makhni, M.C., Riew, K.D. Reoperation Rates After Anterior Cervical Discectomy and Fusion for Cervical Spondylotic Radiculopathy and Myelopathy: A National Population-based Study. *Spine (Phila Pa 1976).* 41 (2016) 1593-1599

Peolsson, A., Vavruch, L., Oberg, B. Predictive factors for arm pain, neck pain, neck specific disability and health after anterior cervical decompression and fusion. *Acta Neurochir (Wien).* 148 (2006) 167-173; discussion 173

Pepke, W., Almansour, H., Richter, M., Akbar, M. Die zervikale spondylotische Myelopathie. *Der Orthopäde.* 47 (2018) 474-482

Rao, R.D., Gourab, K., David, K.S. Operative treatment of cervical spondylotic myelopathy. *J Bone Joint Surg Am.* 88 (2006) 1619-1640



Reinhold, M., Schmid, R., Knop, C., Blauth, M. Komplikationsspektrum operativ versorgter Wirbelsäulenverletzungen. *Trauma und Berufskrankheit*. 7 (2005) S281-S291

Ren, D.J., Li, F., Zhang, Z.C., Kai, G., Shan, J.L., Zhao, G.M., Sun, T.S. Comparison of functional and radiological outcomes between two posterior approaches in the treatment of multilevel cervical spondylotic myelopathy. *Chin Med J*. 128 (2015) 2054-2058

Rhee, J.M., Shamji, M.F., Erwin, W.M., Bransford, R.J., Yoon, S.T., Smith, J.S., Kim, H.J., Ely, C.G., Dettori, J.R., Patel, A.A., Kalsi-Ryan, S. Nonoperative management of cervical myelopathy: a systematic review. *Spine (Phila Pa 1976)*. 38 (2013) S55-67

Sakaura, H., Ohnishi, A., Yamagishi, A., Ohwada, T. Differences in Postoperative Changes of Cervical Sagittal Alignment and Balance After Laminoplasty Between Cervical Spondylotic Myelopathy and Cervical Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament. *Global Spine J*. 9 (2019) 266-271

Shimomura, T., Sumi, M., Nishida, K., Maeno, K., Tadokoro, K., Miyamoto, H., Kurosaka, M., Doita, M. Prognostic factors for deterioration of patients with cervical spondylotic myelopathy after nonsurgical treatment. *Spine (Phila Pa 1976)*. 32 (2007) 2474-2479

Shiokawa, K., Hanakita, J., Suwa, H., Saiki, M., Oda, M., Kajiwara, M. Clinical analysis and prognostic study of ossified ligamentum flavum of the thoracic spine. *J Neurosurg*. 94 (2001) 221-226

Sihvonen, T., Herno, A., Paljärvi, L., Airaksinen, O., Partanen, J., Tapaninaho, A. Local denervation atrophy of paraspinal muscles in postoperative failed back syndrome. *Spine*. 18 (1993) 575-581

Slosar, P.J., Reynolds, J.B., Schofferman, J., Goldthwaite, N., White, A.H., Keaney, D. Patient satisfaction after circumferential lumbar fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 25 (2000) 722-726

Takenaka, S., Kaito, T., Hosono, N., Miwa, T., Oda, T., Okuda, S., Yamashita, T., Oshima, K., Ariga, K., Asano, M., Fuchiya, T., Kuroda, Y., Nagamoto, Y., Makino, T., Yamazaki, R., Yonenobu, K. Neurological manifestations of thoracic myelopathy. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 134 (2014) 903-912

Tetreault, L., Goldstein, C.L., Arnold, P., Harrop, J., Hilibrand, A., Nouri, A., Fehlings, M.G. Degenerative Cervical Myelopathy: A Spectrum of Related Disorders Affecting the Aging Spine. *Neurosurgery*. 77 Suppl 4 (2015a) S51-67

Tetreault, L., Nouri, A., Kopjar, B., Côté, P., Fehlings, M.G. The minimum clinically important difference of the modified Japanese Orthopaedic Association scale in patients with degenerative cervical myelopathy. *Spine*. 40 (2015b) 1653-1659

Tracy, J.A., Bartleson, J.D. Cervical spondylotic myelopathy. *Neurologist*. 16 (2010) 176-187

Uhl, E., Zausinger, S., Marz, U., Rothwinkler, M., Tonn, J.C. [Surgical treatment of cervical spinal canal stenosis in elderly patients]. *MMW Fortschr Med.* 148 (2006) 26-28

Vernon, H., Mior, S. The Neck Disability Index: A study of reliability and validity. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics.* 14 (1991) 409-415

Vyas, K.H., Banerji, D., Behari, S., Jain, S., Jain, V.K., Chhabra, D.K. C3-4 level cervical spondylotic myelopathy. *Neurol India.* 52 (2004) 215-219

Ware J, K.M., Bjorner J, Turner-Bowker D, Gandek B, Maruish M :Development. User's manual for the SF-36v2® Health Survey. Lincoln (RI): QualityMetric incorporated. (2007)

Wilson, J.R., Tetreault, L.A., Kim, J., Shamji, M.F., Harrop, J.S., Mroz, T., Cho, S., Fehlings, M.G. State of the Art in Degenerative Cervical Myelopathy: An Update on Current Clinical Evidence. *Neurosurgery.* 80 (2017) S33-S45

Wu, Z.K., Zhao, Q.H., Tian, J.W., Qian, Y.B., Zhou, Y., Yang, F., Zhao, L., Porter, D.E. Anterior versus posterior approach for multilevel cervical spondylotic myelopathy. *Cochrane Database of Systematic Reviews.* (2016)

Yamazaki, M., Mochizuki, M., Ikeda, Y., Sodeyama, T., Okawa, A., Koda, M., Moriya, H. Clinical results of surgery for thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament. Operative indication of posterior decompression with instrumented fusion. *Spine.* 31 (2006) 1452-1460

Yarbrough, C.K., Murphy, R.K., Ray, W.Z., Stewart, T.J. The natural history and clinical presentation of cervical spondylotic myelopathy. *Adv Orthop.* 2012 (2012) 480643

Zhang, H.Q., Chen, L.Q., Liu, S.H., Zhao, D., Guo, C.F. Posterior decompression with kyphosis correction for thoracic myelopathy due to ossification of the ligamentum flavum and ossification of the posterior longitudinal ligament at the same level. *J Neurosurg Spine.* 13 (2010) 116-122

Zhang, J.T., Wang, L.F., Wang, S., Li, J., Shen, Y. Risk factors for poor outcome of surgery for cervical spondylotic myelopathy. *Spinal Cord.* 54 (2016) 1127-1131

Zhong, Z.-M., Wu, Q., Meng, T.-T., Zhu, Y.-J., Qu, D.-B., Wang, J.-X., Jiang, J.-M., Lu, K.-W., Zheng, S., Zhu, S.-Y., Chen, J.-T. Clinical outcomes after decompressive laminectomy for symptomatic ossification of ligamentum flavum at the thoracic spine. *Journal of Clinical Neuroscience.* 28 (2016) 77-81

Zika, J., Alexiou, G.A., Giannopoulos, S., Kastanioudakis, I., Kyritsis, A.P., Voulgaris, S. Outcome factors in surgically treated patients for cervical spondylotic myelopathy. *J Spinal Cord Med.* 43 (2020) 206-210

**Danksagung**

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Stefan Zausinger für die Überlassung des interessanten Themas bedanken. Mit seiner zuverlässigen und schnellen Korrektur sowie seiner Hilfsbereitschaft war er mir eine große Hilfe.

Ganz besonders möchte ich auch meinem Betreuer Dr. Sebastian Siller für die gute Zusammenarbeit und für sein Engagement bei der Publikation der gewonnenen Erkenntnisse danken.

Herrn Christoph Barth danke ich für zahlreiche Auskünfte und seine Hilfestellung bei technischen Problemen. Frau Köckerandl danke ich für die freundliche Unterstützung beim Zugang zu den Patientendaten.

Für ihre liebevolle Unterstützung und ihren Glauben an mich danke ich meinen Eltern von ganzem Herzen. Ohne Sie wäre der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Meinem Bruder Lucas danke ich dafür, immer mein Vorbild gewesen zu sein und mich auf dem Weg meines Studiums begleitet zu haben. Und Julian danke ich für seine Hilfe, Liebe und Motivation.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Verwandten und Freunden, die mir immer zu Seite standen. Ihr Rückhalt ist ein wichtiger Teil, der zum Erfolg meines Studiums beigetragen hat.

**Affidavit****Eidesstattliche Versicherung**

Pannenbäcker, Laura Maria Edith

---

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,  
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

Bilaterale dorsale Dekompression des Rückenmarks nach unilateraler Eröffnung des Spinalkanals als Alternative zur Laminektomie bei zervikaler und thorakaler spondyloischer Myelopathie

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, den 14.12.21

---

Ort, Datum

Laura Pannenbäcker

Unterschrift Doktorandin

**Veröffentlichung von Teilergebnissen dieser Arbeit**

Siller S, Pannenbaecker L, Tonn JC, Zausinger S. Surgery of degenerative thoracic spinal stenosis-long-term outcome with quality-of-life after posterior decompression via an uni- or bilateral approach. *Acta Neurochir (Wien)*. 2020 Feb;162(2):317-325. doi: 10.1007/s00701-019-04191-x. Epub 2019 Dec 23. PMID: 31873792

Mündlicher Vortrag auf der Jahrestagung der Sektion Wirbelsäule der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie am 07.09.2019 in Gießen und auf der 14. Jahrestagung der Deutschen Wirbelsäulengesellschaft am 28.11.2019 in München

Mündlicher Vortrag auf der 71. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie (DGNC), 9. Joint Meeting mit der Japansichen Gesellschaft für Neurochirurgie, 21.-24.06.2020, Düsseldorf