

Aus dem
CharitéCentrum 15 für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie
Klinik für Neurochirurgie
Direktor: Prof. Dr. Peter Vajkoczy

Habilitationsschrift

Operative Behandlungsmöglichkeiten und anatomische Einflussfaktoren bei Patienten mit degenerativer Spinalkanalstenose

zur Erlangung der Lehrbefähigung
für das Fach Neurochirurgie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité-Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. Simon Heinrich Bayerl
geboren in Berlin

Eingereicht: Februar 2019

Dekan: Prof. Dr. med. Axel R. Pries

1. Gutachter: Prof. Dr. Rolf Kalff

2. Gutachter: Prof. Dr. Ulf R. Liljenqvist

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	4
1. Einleitung	5-15
1.1 Anatomie und Pathologie des Spinalkanals	5-7
1.2 Definition der sagittalen Stellung der Wirbelsäule	7-8
1.3 Klinische Symptome bei degenerativer Spinalkanalstenose	8-9
1.3.1 Symptome bei Spinalkanalstenose der Halswirbelsäule	8-9
1.3.2 Symptome bei Spinalkanalstenose der Brustwirbelsäule	9
1.3.3 Symptome bei Spinalkanalstenose der Lendenwirbelsäule	9
1.4 Diagnose der Spinalkanalstenose	10-12
1.5 Therapie der degenerativen Spinalkanalstenose	12-15
1.5.1 Therapie der Spinalkanalstenose der Halswirbelsäule	12-13
1.5.2 Therapie der Spinalkanalstenose der Lendenwirbelsäule	14-15
2. Zielsetzung der Arbeit	16-17
3. Eigene Ergebnisse	18-65
3.1 Ventrale Fusionsverfahren der Halswirbelsäule	18-35
3.1.1 Interkorporelle Fusion bei zervikaler Spinalkanalstenose	18-25
3.1.2 Zwei-Höhen-Korporektomie bei zervikaler Spinalkanalstenose	26-35
3.2 Einflussfaktoren bei der lumbalen Spinalkanalstenose	36-62
3.2.1 Einfluss der Sagittalen Balance auf das operative Ergebnis von Patientinnen mit lumbaler Spinalkanalstenose	36-44
3.2.2 Einfluss des Sagittalen Profils auf das operative Ergebnis von Patienten mit lumbaler Spinalkanalstenose	45-54
3.2.3 Spinalkanalstenose bei lumbaler epiduraler Lipomatose – Ätiologie, Symptome, operative Behandlung und Prognose	55-65
4. Diskussion	66-71
4.1 Ventrale zervikale Fusionsverfahren – Sicherheit, Effektivität und Stabilität im Langzeitverlauf	66-69
4.2 Anatomische und pathologische Einflussfaktoren auf das operative Ergebnis von Patientinnen mit lumbaler Spinalkanalstenose	69-71
5. Zusammenfassung	72-73
6. Literaturverzeichnis	73-87
7. Danksagung	88
8. Eidesstattliche Erklärung	89

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

DZM	Degenerative Zervikale Myelopathie
LEL	Lumbale Epidurale Lipomatose
MRT	Magnetresonanztomographie
PI	Pelvic incidence
PT	Pelvic Tilt
SB	Sagittale Balance
SKS	Degenerative Spinalkanalstenose
SPT	Sagittales Profiltyp
SS	Sacral Slope

Für die Lesbarkeit des Textes wurden in dieser Arbeit die feminine und maskuline Form wechselnd verwendet. Die Angaben beziehen sich jedoch auf alle Geschlechter in gleicher Weise.

1. Einleitung

1.1 Anatomie und Pathologie des Spinalkanals

Die Columna vertebralis – das knöcherne Gerüst der Wirbeltiere – stellt beim Homo sapiens die Grundvoraussetzung für das aufrechte Stehen und Gehen dar. Die habituelle Bipedie des Menschen wird durch die Schwingungen der Wirbelsäule ermöglicht, welche einerseits zu einer höheren Stabilität und Elastizität führen, andererseits die Mobilität des Rumpfes und die Balance des Zweibeiners ausmachen⁷⁶. Neben der statischen Funktion hat die Wirbelsäule auch eine schützende Funktion für Rückenmark und Cauda Equina, Radices spinales, Ganglia spinales sowie die Arteriae vertebrales. Das Myelon, die Cauda equina sowie die Radices spinales verlaufen im Canalis vertebrae – dem Spinalkanal. Dieser ist von dorsal begrenzt durch die Lamina arcus vertebrae, die Articulationes processuum articularium und das Ligamentum flavum. Lateral begrenzt ihn der Pediculus arcus vertebrae, das Foramen vertebrale und das Ligamentum flavum. Die ventrale Begrenzung sind das Ligamentum longitudinale posterius bzw. die Hinterkante des Corpus vertebrae und der Discus intervertebralis. Der Spinalkanal ist trotz seiner Ummauerung mit Band- und Knochenstrukturen in bestimmten Abschnitten sehr mobil – besonders in der Hals und Lendenwirbelsäule. Hierdurch sind die unterschiedlichen Segmente auch sehr unterschiedlicher Belastung ausgesetzt. Die intraspinalen Anteile des zentralen und peripheren Nervensystems bewegen sich bei physiologischer Anatomie ebenfalls dynamisch mit. Es kann jedoch durch unterschiedliche Pathologien zu einer Einengung des Spinalkanals kommen, so dass Rückenmark oder auch Cauda Equina sowie entsprechende Nervenwurzeln bei bestimmten Bewegungen oder auch permanent komprimiert werden. Ursache hierfür können Traumata, spontane Blutungen, Tumoren und Infektionen sein. Die häufigste ursächliche Pathologie ist jedoch die degenerative Spinalkanalstenose (SKS), bei welcher eine mechanische Einengung aufgrund degenerativer Prozesse in den angrenzenden Strukturen entsteht. Diese wurde erstmalig 1949 von dem niederländischen Neurochirurgen Professor Dr. Henk Verbiest beschrieben¹⁴¹. Bandscheibendegenerationen führen zu Höhenminderung der Bandscheiben, zu Bandscheibenvorwölbungen oder Bandscheibenvorfällen und hierdurch kann sowohl eine laterale SKS im Recessus lateralis oder Neuroforamen als auch eine zentrale SKS entstehen. Durch Degeneration der Bandscheiben kommt es zu einer Mehrbelastung der Facettengelenke mit konsekutiven Spondylarthrosen, welche zu Gelenkshypertrophien führen können. Im Rahmen dieser Degenerationen kann es wiederum zu einer Überbelastung und reaktiver Hypertrophie der Ligamenta flava sowie zu einem Wirbelkörpergleiten (Spondylolisthesis) oder auch zu einer degenerativen Skoliose kommen

⁶³. Die Spondylolisthesis beinhaltet eine Verschiebung der Wirbelkörper nach vorne (Anterolisthesis) oder nach hinten (Retrolisthesis). Per Definitionem gibt es verschiedene Formen der Spondylolisthesis in Abhängigkeit von der Kausalität, die der Pathologie zugrunde liegt. Neben der dysplastischen und isthmischen angeborenen Form treten auch erworbene Formen wie die degenerative, die traumatische, die pathologische und die postoperative Form auf. Der Schweregrad der Spondylolisthese wird nach Meyerding in vier Stadien eingeteilt. Bei Grad I nach Meyerding sind die Wirbelkörper um weniger als 25% zueinander verschoben, bei Grad II um 25-50%, bei Grad III um 50-75% und bei Grad IV um mehr als 75%. Diese Degenerationsprozesse können zu lateralen, zentralen oder foraminalen SKS führen, welche Patientinnen hinsichtlich ihrer Mobilität und Lebensqualität stark beeinträchtigt ⁶³. Neben ligamentärer Hypertrophie, Facettengelenkshypertrophie, Bandscheibenvorfällen und einer segmentalen Instabilität spielen insbesondere bei der zervikalen Myelopathie eine Verknöcherung des hinteren Längsbandes oder auch des Ligamentum flavum und auch genetische Faktoren sowie kongenitale Fehlbildungen (Down Syndrom, Klippel-Feil-Syndrom) eine große Rolle ^{7,90}. Bei der zervikalen SKS kommt es durch die Rückenmarkskompression häufig zu einer degenerativen spinalen Myelopathie (DSM). Hierbei kommt es durch die Kompression zu einer eingeschränkten Blutversorgung, einer Demyelinisierung der weißen Substanz sowie einer immunologischen Reaktion und Zelluntergang im Rückenmark ⁹⁰. Am häufigsten entsteht eine degenerative SKS in Junghans'schen Bewegungssegmenten mit hoher Mobilität und konsekutiv hoher mechanischer Belastung wie in der unteren Lendenwirbelsäule und der unteren Halswirbelsäule ⁶⁴. In der Lendenwirbelsäule tritt die degenerative SKS am häufigsten in den Segmenten LWK 3/4 und 4/5 ¹⁴⁶ auf und in der Halswirbelsäule am häufigsten in den Segmenten HWK 3/4 und 4/5 ⁵¹.

Die Anatomie ihres Spinalkanals weist ethniespezifische Unterschiede auf ^{71,135}. Die Beurteilung der degenerativen SKS und die Abgrenzung von einer physiologischen Enge des Spinalkanals erfordert einen hohen Erfahrungsschatz der/des Behandlerin/Behandlers und die therapeutische Entscheidungsfindung ist keineswegs trivial. Die weltweit steigende Lebenserwartung und der damit einhergehende demographische Wandel insbesondere in den Industrieländern führen zu einer erhöhten Prävalenz von Erkrankungen, die typischerweise im fortgeschrittenen Alter auftreten. Hierzu gehören auch in besonderem Maß degenerative Erkrankungen des Bewegungsapparates wie die degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen ³⁰. Es kommt im höheren Alter vermehrt zur Degeneration von Bandscheiben, Facettengelenken und hierdurch zu konsekutiven Veränderungen von Band- und Knochenstrukturen. Diese Faktoren erhöhen die Wahrscheinlichkeit im fortgeschrittenen Alter eine SKS zu entwickeln. Selbst bei asymptomatischen über sechzigjährigen Probanden wurde eine lumbale SKS bildgebend in über 20% identifiziert ^{8,50}. Bei Patienten über 70 Jahren haben über 70% eine

laterale oder zentrale lumbale SKS ¹¹⁶. Bei Patientinnen über 65 Jahren wurde eine zervikale SKS bei ca. 26% der asymptomatischen Patienten festgestellt ¹³⁶.

Fünfundachtzig Prozent der deutschen Bevölkerung geben an bereits einmal unter Rückenschmerzen gelitten zu haben. Die Prävalenz von Rückenschmerzen beträgt in der deutschen Bevölkerung 32-49% ^{105,118}. In dieser Gruppe wird die Zahl der Patientinnen mit lumbaler SKS deutlich höher sein als in der asymptomatischen Bevölkerung. Bereits in den 80er und 90er Jahren wurde in Schweden die Inzidenz der symptomatischen lumbalen SKS mit 5/100.000 angegeben ⁵². Durch den Alterungsprozess der Bevölkerung und die Verfügbarkeit der Schnittbildgebung wird diese Zahl heute bereits deutlich größer sein. Auch die Patienten mit zervikaler SKS sind hierbei nicht erfasst ⁹¹. Diese Zahlen verdeutlichen die epidemiologische und gesundheitsökonomische Bedeutung der Erkrankung.

1.2 Definition der sagittalen Stellung von Wirbelsäule und Becken

Die Stellung der Wirbelsäule wie im ersten Kapitel der Einleitung beschrieben wird durch eine harmonische Schwingung der gesamten Wirbelsäule balanciert, damit möglichst wenig muskuläre Energie zur Aufrichtung der Wirbelsäule eingesetzt werden muss. Daher wurden physiologische sagittale Parameter des Beckens sowie der Wirbelsäule anhand von gesunden Probanden definiert ^{112,142}. Wichtig zur Beurteilung der Wirbelsäulenstellung sind dabei insbesondere die lumbale Lordose sowie die thorakale Kyphose. Zur Darstellung der Beckenanatomie im Verhältnis zur Wirbelsäule sind die Pelvic incidence (PI), der Pelvic Tilt (PT) sowie der Sacral Slope (SS) wichtig. Die PI ist hierbei eine konstante Größe bei jedem Individuum und bestimmt die Ausrichtung des Beckens. Der SS und der PT können durch willkürliche oder unwillkürliche Ausrichtung des Beckens in ihrer Größe beeinflusst werden und ergeben in ihrer Summe die PI. Durch die Stellung des Beckens und das Alignment der Wirbelsäule wird die Balance der Wirbelsäule aufrechterhalten bis zu einem Punkt, an dem Kompensationsmechanismen nicht mehr greifen. Dann kommt es zu einer sagittalen Dysbalance, welche zu einer permanenten ventralen Neigung des Rumpfes führt. Als quantitativer Parameter hierfür dient unter anderem der Abstand des C7-Lots zur Hinterkante des Os sacrum oder auch die sagittal vertical axis (SVA). Hierdurch und durch ähnliche Parameter kann daher bestimmt werden, ob sich die Wirbelsäule in der sagittalen Balance befindet oder ob es zu einer Dysbalance gekommen ist.

Neben der sagittalen Balance gibt es auch unterschiedliche sagittale Profile, welche sich durch die Stellung des Beckens sowie der sagittalen Parameter ergeben. Roussouly teilte die

sagittalen Profile in vier unterschiedliche Typen ein ^{112,114}. Beim Typ 1 und Typ 2 ist der Sacral Slope kleiner als 25°. Beim Typ 1 besteht eine ausgeprägte lumbale Lordose in den unteren Segmenten und eine langstreckige thorakolumbale Skoliose. Hierdurch kommt es zu einer starken Belastung der dorsalen Strukturen in der unteren LWS (Facettengelenke, Bandapparat und Muskulatur). Beim Typ 2 nach Roussouly besteht hingegen eine sehr flache Lordose und flache thorakale Kyphose mit sehr steil gestellter Wirbelsäule. Die axiale Belastung ist bei diesen Patientinnen hoch. Der Typ 3 ist der „harmonische Typ“ mit mittlerem Pelvic Tilt, mittelgradigem Sacral Slope (35-45°) und gleichmäßiger lumbaler Lordose und thorakaler Kyphose. Der Typ 4 hat eine hohe Pelvic Incidence, einen großen Sacral Slope (>45°) und eine sehr ausgeprägte Lordose lumbal sowie eine ausgeprägte Kyphose thorakal. Hier kommt es insbesondere zu erhöhten Scherkräften und potentiell vermehrt zu erworbenen Spondylolisthesen ¹¹³. Die unterschiedlichen Typen des Sagittalen Profils beeinflussen Degenerationsprozesse und Therapieergebnisse. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Stellung des Beckens und der Wirbelsäule. Dieser kann die Funktion und die alltägliche Belastung der Wirbelsäule stark beeinflussen und spielt daher eine große Rolle für pathologische Veränderungen und Therapiekonzepte.

1.3 Klinische Symptome der Spinalkanalstenose

1.3.1 Klinische Symptome der Spinalkanalstenose der Halswirbelsäule

Die Symptome der zervikalen Myelopathie wurden erstmals von Baron Walter Russell Brain 1952 beschrieben ¹⁴. Bei der zervikalen SKS, die zu einer Nervenwurzelkompression im Spinalkanal oder auch durch Neuroforamenstenose führt, treten im frühen Stadium häufig radikuläre Syndrome ebenfalls in Form von Schmerzen auf. Bei fortschreitender Klinik kann es auch zu Sensibilitätsstörungen und Paresen in den Armen kommen. Bei zentraler zervikaler SKS lässt sich im frühen Stadium bei vielen Patienten eine spinale Ataxie durch eine Kompression des Hinterstränge feststellen.

Da die zervikale SKS am häufigsten im Bereich der mittleren und unteren HWS auftritt kommt es durch die Kompression der propriozeptiven Bahnen des Fasciculus gracilis insbesondere zu einer Koordinationsstörung der Beine. Diese spinale Ataxie kann in einigen Fällen auch isoliert auftreten und daher muss bei Gangstörung und Fallneigung eines Patientinnen unbedingt an eine zervikale Myelopathie im Anfangsstadium gedacht werden. Im Verlauf kommen insbesondere durch epikritische Efferenzstörungen sensible Defizite von Händen und Füßen hinzu. Diese sind typischerweise nicht monoradikulär sondern betreffen zunächst die distalen Extremitäten. Auch Blasen- und Mastdarmstörungen können im Verlauf auftreten. Im

fortgeschrittenen Stadium kommt es dann zu einem inkompletten bis hin zu einem kompletten Querschnittsyndrom ^{91,139}. Durch eine zervikale SKS ist das Risiko einer Rückenmarksverletzung nach leichteren Traumata erhöht. Die klinische Relevanz und die Notwendigkeit einer prophylaktischen Dekompression bei sturzgefährdeten Patienten ist jedoch umstritten ^{41,107}.

1.3.2 Brustwirbelsäule

Die symptomatische SKS an der Brustwirbelsäule ist sehr selten, da Brustwirbelsegmente mit Ihrer hohen Rigidität weniger Belastungen ausgesetzt sind. Die thorakale SKS und die zervikale SKS können in ihrem klinischen Erscheinungsbild sehr ähnlich sein. Auch hier kommt es im frühen Stadium zu radikulären Symptomen einhergehend mit thorakalen gürtelförmig ausstrahlenden Schmerzen entlang der Dermatome und Sensibilitätsstörungen. Klinisch Betroffen sind die unteren Extremitäten. Durch Kompression der Hinterstränge ist außerdem die spinale Ataxie ein typisches Frühsymptom wie bereits bei der zervikalen SKS beschrieben ²⁶.

1.3.3 Lendenwirbelsäule

Die Lordose der Lendenwirbelsäule führt zu einer Verschmälerung des Spinalkanals. Daher ist die typische Symptomatik der lumbalen SKS zunächst belastungsabhängig undstellungsabhängig. Die Kyphosierung durch Hinsetzen oder die Rumpfbeugung beim Gehen nach vorne führt in der Regel zu einer Regredienz der Symptome. Patientinnen können daher häufig symptomfrei Fahrrad fahren ²³. Das Leitsymptom der lumbalen SKS ist die Claudicatio spinalis. Hierbei treten belastungsabhängige Schmerzen in der unteren Lendenwirbelsäule, gluteal und in den Beinen auf. Dies führt zu einer Verminderung der Gehstrecke und hierdurch zu einer eingeschränkten Mobilität der Patienten. Häufig treten auch ein Müdigkeitsgefühl oder Schweregefühl in den Beinen auf ⁵⁴. Früh und sehr häufig kommt es auch zu Dysästhesien in den Beinen ⁴⁴. Im fortgeschrittenen Stadium kann es zu funktionell einschränkenden neurologischen Ausfällen wie Paresen, und Blasen-, Mastdarmstörungen, bis hin zum Cauda-equina-Syndrom kommen.

Die Symptomatik ist meist langsam über Monate oder Jahre hinweg progredient. Es kann aber auch insbesondere durch Bagateltraumata oder auch ungewöhnliche Belastungen zu einer schubförmigen Verstärkung der Symptome kommen.

1.4 Diagnose der Spinalkanalstenose

Entscheidend für die Diagnose einer lumbalen SKS ist die Anamnese. Hierbei beschreiben die Patientinnen häufig die typischen belastungsabhängigen Schmerzen, die Behinderung im Alltag und die Einschränkung der Lebensqualität. Im frühen Stadium ist die klinische Untersuchung der LWS und auch die neurologische Untersuchung häufig unauffällig. Dies sollte jedoch nicht dazu führen, dass die potentiell starke Einschränkung der Lebensqualität durch die belastungsabhängigen Schmerzen von der/dem UntersucherIn unterschätzt wird. Die Anamnese der Gehstrecke ist essential und spielt für die Diagnose eine große Rolle. Beim Fortschreiten der Erkrankung werden häufig radikuläre Syndrome in Form von dermatombezogenen Schmerzen, Par- und Hypästhesien, Kennmuskelparesen oder sogar Muskelatrophien der Kennmuskeln apparent. Zur Quantifizierung der Beschwerden ist der am häufigsten eingesetzte Score der Oswestry Disability Index (ODI) und zur Bestimmung der gesundheitsassoziierten Lebensqualität werden häufig Scores wie der Health Survey 36-Item Score (SF-36) angewendet ⁷⁸.

Auch bei der thorakalen und auch der zervikalen SKS treten die Beschwerden üblicherweise schleichend auf. Frühzeichen sind häufig Zervikalgien und Brachialgien. Bei einigen Patienten ist das Lhermitte-Zeichen positiv. Hierbei kommt es bei Inklination des Kopfes zu „stromschlagartigen“ Schmerzen im Rumpf und in den Armen als Indikator für eine meningeale Reizung auf Höhe der stenotischen Segmente. Es treten frühzeitiger neurologische Defizite wie die spinale Ataxie sowie Sensibilitätsstörungen und Koordinationsstörungen der Extremitäten auf. Zur Einstufung der Ausprägung der zervikalen Myelopathie dienen der modified Japanese Orthopedic Association Score (mJOA), die Nurick Scale, zur Einstufung der Beeinträchtigung durch Nackenschmerzen der Neck Disability Index ⁵⁵. Bei der zervikalen SKS kann insbesondere durch kleine Traumata verstärkt frühzeitig eine Querschnittssymptomatik auftreten, da der Spinalkanal deutlich weniger Kompensationsraum aufweist als in der Lendenwirbelsäule.

Die **Computertomographie**, welche eine knöcherne SKS sicher diagnostizieren kann, ist in der Weichteilauflösung innerhalb des Spinalkanals der MRT Diagnostik deutlich unterlegen. Sie dient insbesondere der Identifizierung von Frakturen, Osteophyten, und Verkalkungen, Spondylolysen und anderen Instabilitäten.

Diagnostischer Goldstandard für die degenerative SKS ist die **Magnetresonanztomographie** (MRT) ^{64,109}. Diese ermöglicht die Darstellung der Liquorzirkulation um das Myelon und im Canalis centralis wie auch zwischen den Nervenfaszikeln der Cauda Equina und um die Radices spinalis im Neuroforamen. Auch die Wirbelkörper, Bandscheiben sowie Ligamente und ihre pathologischen Veränderungen können gut beurteilt werden. Der Verlauf einzelner

Nervenwurzeln lässt sich in dünn-schichtiger MRT-Diagnostik nachvollziehen und jedwede permanente Kompression erkennen. Auch das Rückenmark selbst und eine etwaige Myelopathie lassen sich in der MRT gut beurteilen. Eingeschränkt ist die MRT-Diagnostik insbesondere bei Metallimplantaten. Einige Implantate sind eine Kontraindikation für die MRT-Diagnostik, andere Metallimplantate führen zu ausgeprägten Artefakten in der Bildgebung, welche die Beurteilung deutlich erschweren. Ein weiterer Nachteil der konventionellen MRT-Diagnostik ist, dass die Aufnahmen in Rückenlage erfolgen. Diese führt zu einer Entlordosierung und somit zu einer Erweiterung des Spinalkanals auf Höhe der Bandscheibenflächen. In der stehenden Position ist der Spinalkanal daher häufig noch stärker eingengt als es sich in der konventionellen MRT darstellen lässt ¹⁰⁹.

Das **Upright-MRT**, welches die kinetische Bildgebung bei stehenden Patientinnen zulässt, ermöglicht die Beurteilung der SKS auch in Funktion ². Durch den hohen technischen Aufwand ist der Zugriff auf diese Geräte im klinischen Alltag jedoch noch sehr begrenzt.

Wenn die MRT-Bildgebung zum Beispiel durch Artefakte von Metallimplantaten nicht gut beurteilt werden kann oder wenn eine Kontraindikation für eine MRT besteht kann eine **Post-Myelographie-Computertomographie** durchgeführt werden. Hierbei wird nach intra-thekaler Gabe von Kontrastmittel Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule (Myelographie) eine Computertomographie durchgeführt. Durch das Kontrastmittel können die Liquorräume in der Schnittbildgebung gut beurteilt werden und SKS sowie Foramenstenosen identifiziert werden ^{57,84}.

Wichtig zur Identifizierung von Instabilitäten und zur Beurteilung der Mobilität der Wirbelsäule sind **Röntgenaufnahmen in Funktion** ¹⁴⁸. Hierbei werden in maximaler Inklination und Reklination Röntgenaufnahmen gemacht und die Bewegung der einzelnen Segmente beurteilt. Eine weitere diagnostische Möglichkeit ist der Vergleich von Röntgenaufnahmen im Liegen und im Stehen, welcher Rückschlüsse auf eine etwaige Instabilität zulässt ⁹⁷.

Zur Beurteilung von Skoliosen, skoliotischen Fehlhaltungen, sagittaler Stellung von Wirbelsäule, Becken und Beinen, ist eine **Röntgenaufnahme der gesamten Wirbelsäule** im Stehen in 2 Ebenen Goldstandard. Hierbei können die Parameter zur Beschreibung der Becken- und Wirbelsäulenstellung erhoben werden, mit einem 3-D-Softwaresystem ausgewertet werden und im Fall der Notwendigkeit einer Instrumentierung die operativen Schritte für eine mögliche Rekonstruktion geplant werden ^{87,149}.

Bei atypischem klinischem Erscheinungsbild kann die **neurophysiologische Untersuchung** sinnvolle Zusatzinformationen erbringen. Somatosensorisch evozierte Potentiale (SSEPs) und motorisch evozierte Potentiale können einen Hinweis auf eine Schädigung des zentralen Nervensystems im Sinne einer Myelopathie anzeigen, die Elektromyographie (EMG) der Kennmuskeln kann eine radikuläre neuronale Schädigung verifizieren und mit der EMG sowie

der Nervenleitgeschwindigkeit können zudem periphere Nervenkompressionssyndrome differentialdiagnostisch ausgeschlossen werden.

1.5 Therapie der Spinalkanalstenose

Bei der Erstdiagnose der symptomatischen SKS werden in der Regel konservative Behandlungsmaßnahmen durchgeführt. Diese können eventuell die operative Behandlung bei leichtgradig betroffenen Patienten verhindern oder auch den Zeitpunkt der Operation verzögern. Eine kurative Behandlung ist hierdurch nicht möglich. Der degenerative Prozess kann eventuell aufgehalten werden aber nicht rückgängig gemacht werden. Häufig ist im Verlauf eine operative Therapie notwendig. Bei einer Operation müssen die nervalen Strukturen dekomprimiert werden und gleichzeitig muss die Stabilität der Wirbelsäule gewahrt oder wiederhergestellt werden. Für den langfristigen Erfolg sollten möglichst physiologische strukturell-statische Verhältnisse für die Wirbelsäule erhalten bzw. rekonstruiert werden.

1.5.1 Therapie der zervikalen Spinalkanalstenose

Die symptomatische zervikale SKS kann konservativ mit physiotherapeutischen und gegebenenfalls schmerztherapeutischen Maßnahmen behandelt werden. Die degenerative zervikale Myelopathie (DZM) kann konservativ behandelt werden sofern sie als leichtgradig eingestuft wird. Die Datenlage zum Therapieerfolg des konservativen Procedere ist in der Literatur mit dem Therapieerfolg einer Operation aktuell vergleichbar. Bei klinisch mittelgradiger bis schwerer DZM sollte eine operative Dekompression bevorzugt werden, da mit rein konservativem Therapieansatz häufig eine neurologische Verschlechterung eintritt und diese zum Teil nicht reversibel ist. Die Literatur zum Vergleich beider Therapieverfahren beruht jedoch auf wenigen Studien mit niedriger Evidenzklasse ^{106,108}. Ein spätes operatives Vorgehen geht jedoch mit einem erhöhten perioperativen Risiko einher ¹²².

Wenn die Indikation für eine operative Dekompression gestellt wird, sollte im nächsten Schritt die Wahl des operativen Verfahrens sorgfältig geprüft werden. Unter diesen operativen Verfahren ist ein möglicher Zugangsweg des zervikalen Spinalkanals die dorsale Eröffnung. Über diesen dorsalen Zugang kann die Dekompression durch eine Laminektomie mit Entfernung der Wirbelbögen und des Ligamentum flavum dorsal der stenotischen Segmente erfolgen ^{9,111}. Diese Laminektomie kann mit und ohne zusätzliche dorsale Instrumentierung durchgeführt werden. Alternativ kann auch eine Laminoplastie erfolgen, bei welcher eine Dekompression mit Entfernung der Lamina und des Ligamentum flavums erfolgt und hiernach der Wirbelbogen wiedereingesetzt wird. Der Vorteil des einen oder anderen operativen

Vorgehens von dorsal wurde bereits umfangreich in der Literatur diskutiert ⁶⁶. Alle oben beschriebenen Verfahren sind in ihrem klinischen Ergebnis gleichwertig und führen zu einer Reduktion der Schmerzsymptomatik sowie der neurologischen Defizite. Das operative Muskeltrauma ist bei der Laminoplastie reduziert, sodass die Muskulatur geringer atrophiert, wohingegen die Laminektomie die Dekompression vereinfacht und über einen längeren Zeitraum gewährleistet. Hierbei sind der Blutverlust und das muskuläre Trauma mit konsekutiver Muskelatrophie vergleichsweise größer ^{4,66}.

Alternativ zur dorsalen Dekompression kann auch eine Entlastung von ventral erfolgen ¹⁵³. Die ventrale Diskektomie beinhaltet die Entfernung der Bandscheibe über einen ventro-lateralen Zugang. Auf diese Weise wird der Spinalkanal von ventral auf Höhe des Segments dekomprimiert. Daraufhin kann entweder ein Cage oder ein Knocheninterponat eingesetzt und gegebenenfalls eine zusätzliche ventrale Plattenosteosynthese angeschlossen werden. Statt einer Fusion der Segmente kann auch eine Bandscheibenprothese zur Erhaltung der Beweglichkeit in dem entsprechendem Segment eingebracht werden ^{34,98}. Die ventrale Diskektomie ermöglicht die Entfernung von Bandscheibenvorfällen und deck- und grundplattennahen Retro-Spondylophyten, welche das zervikale Myelon oder ihre zervikalen Radices komprimieren.

Bei langstreckigen Pathologien, voroperierten Patientinnen oder auch Deformitäten kann als ventrales Verfahren auch eine Korporektomie eingesetzt werden, welche eine invasivere Technik mit höheren Komplikationsraten darstellt ¹²³. Bei degenerativen Erkrankungen wird hierbei eine Teil-Korporektomie durchgeführt, die medianen Wirbelkörperanteile ventral des Duralschlauchs sowie die angrenzenden Bandscheibenfächer entfernt und im nächsten Schritt Knochen oder auch ein großer Cage von ventral eingebracht. Die Lordose der Halswirbelsäule kann durch die interkorporelle Fusion rekonstruiert werden. Es gibt Cages, die mit Schrauben an den angrenzenden Wirbelkörpern fixiert werden. Andernfalls erfolgt die zusätzliche Plattenosteosynthese von ventral. Nur wenige kleinere Studien und Fallserien haben das klinische und statische Resultat der Korporektomie untersucht. Die primären operativen Ergebnisse sind gut, im Verlauf kommt es jedoch häufig zu Materialdislokationen, welche Revisionsoperationen notwendig machen können. Daher wird von vielen Autoren insbesondere bei der multisegmentalen Korporektomie eine zusätzliche dorsale Instrumentierung empfohlen. Die Evidenz für die zusätzliche dorsale Instrumentierung ist schwach, und die Indikation für eine 360°-Stabilisierung ist arbiträr.

Ventrale und dorsale Operationstechniken wurden bereits in multiplen Studien verglichen wobei im Konsens alle (Ventrale Diskektomie und Fusion oder Arthroplastie, Korporektomie, Laminoplastie, Laminektomie und Fusion) ihre Einsatzberechtigung bei unterschiedlichen

Pathologien haben und die Entscheidungsfindung sollte mit Rücksicht auf ein individualisiertes Patientenkonzept erfolgen. ^{5,20,25,31,40,56,65,115}.

1.5.2 Therapie der lumbalen Spinalkanalstenose

Bei Patientinnen mit leichter Symptomausprägung und lumbaler SKS kann zunächst ein konservatives Therapiekonzept verfolgt werden, welches bei einem Teil der Patienten bereits zu einer klinischen Besserung führen kann ^{86,126}. Bei progredienten Symptomen oder dem Auftreten von funktionell einschränkenden neurologischen Defiziten wird ein operatives Vorgehen empfohlen. Die operative Therapie der lumbalen SKS bei schwerer betroffenen Patientinnen ist der konservativen Therapie überlegen ¹⁴⁷. Die Kurz- und Mittelzeitergebnisse der operativen Dekompression sind gut und die Patienten profitieren hinsichtlich ihrer Claudicatio spinalis, des Rückenschmerzes, der schmerzassoziierten Behinderung und der Lebensqualität ^{46,146}. In der longitudinalen Betrachtung über mehrere Jahre verwässert diese Evidenz, am ehesten zeigt sie eine Annäherung der klinischen Ergebnisse nach Operation und nach konservativer Therapie ⁶. Der Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT) ist die größte randomisierte Multicenter-Studie, die das klinische Resultat von Patientinnen mit lumbaler SKS untersucht hat und das konservative Procedere dem operativen Procedere gegenübergestellt hat. Auch hier scheinen sich im 8-Jahres Verlauf die klinischen Resultate der operativen und konservativen Gruppe anzunähern. Die Aussagekraft der Langzeitergebnisse ist durch das Herausfallen von Patienten während der Nachbeobachtungsphase oder durch Folgeoperationen in beiden Studienarmen eingeschränkt ⁷⁷. Für Patientinnen mit einer schmerzbedingten Behinderung ist eine mittelfristige Schmerzreduktion und Steigerung der Lebensqualität essentiell auch wenn der Therapieeffekt zeitlich begrenzt ist.

Bei der lumbalen SKS kann der Zeitpunkt des operativen Verfahrens variabler als bei der zervikalen SKS gewählt werden, da funktionell einschränkende persistierende neurologische Defizite häufig erst spät auftreten. Der rein schmerztherapeutisch gewählte Zeitpunkt des chirurgischen Eingriffs kann sehr individuell nach Wunsch und subjektivem Empfinden der/des Patienten ausgewählt werden. Die konservative Therapie sollte nicht bis hin zur absoluten Immobilität ausgereizt werden und entsprechend ist es relevant den OP-Zeitpunkt sorgfältig zu wählen, da mehrere Studien gezeigt haben, dass eine frühe operative Dekompression bei degenerativer SKS der späten Operation überlegen ist ^{53,92,103}.

Es gibt unterschiedliche operative Techniken um eine lumbale SKS zu dekomprimieren. Eine Laminektomie beinhaltet die Entfernung des gesamten hinteren Wirbelbogens sowie des

Ligamentum flavum, wobei die Facettengelenke erhalten bleiben. Diese Methode facilitates die großflächige Dekompression. Andererseits werden dorsale knöcherne und ligamentäre Strukturen komplett entfernt und stehen nicht mehr zur Erhaltung der Stabilität zur Verfügung. Alternativ kann eine interlaminäre Fensterung (Laminotomie) durchgeführt werden. Hierdurch kann mit einer Teilentfernung der Wirbelbögen entweder von einer Seite oder auch von beiden Seiten eine Dekompression des gesamten Spinalkanals mit Entfernung der knöchernen Einengung und des Ligamentum flavum erfolgen, ohne dass der Processus spinosus entfernt und das Ligamentum supraspinale und interspinale durchtrennt werden müssen ^{24,96,138}. Mithilfe eines endoskopischen Zugangs kann die Verletzung der dorsalen Strukturen zusätzlich minimiert werden ¹⁵⁰.

Präoperativ sollte bei einer SKS immer eine Röntgenfunktionsaufnahme zum Ausschluss einer Makroinstabilität erfolgen, welche um so zwingender erforderlich wird, wenn eine zusätzliche Spondylolisthese vorliegt. Falls sich bei Inklination oder Reklination ein signifikanter Unterschied mit progredientem Wirbelgleiten darstellt, muss eine Spondylodese und keine reine Dekompression erfolgen. Auch Patientinnen mit Spondylolisthese und konsekutiver SKS profitieren von einer Dekompression. ¹⁴⁵. Da bei einer Spondylolisthese mit SKS eine mikrochirurgische Dekompression ohne Instrumentierung des Segments keine Korrektur des verschobenen Segments ermöglicht und potentiell durch die Operation noch eine zusätzliche Instabilität des Segments entsteht, wurde in der Literatur lange kontrovers diskutiert, ob eine operative Stabilisierung durchgeführt werden muss, wenn der Spinalkanal dekomprimiert wird. Studien, die den Vorteil einer zusätzlichen Stabilisierung gegenüber der reinen Dekompression darstellen konnten, haben bei der Dekompression eine Laminektomie durchgeführt, welche eine sehr destabilisierende Dekompressionstechnik ist, und somit die Wahrscheinlichkeit einer postoperativen Zunahme der Spondylolithese im besonderen Maße erhöht ³⁹. Andere Studien konnten jedoch zeigen, dass eine einfache Dekompression ähnlich gute Ergebnisse bei vergleichsweise geringerem operativem Aufwand, Blutverlust und Operationskosten erzielt ^{37,48}.

Eine zusätzliche dorsale Instrumentierung der lumbalen SKS ist bei den meisten Patienten ohne hochgradige Instabilität nicht notwendig ⁵⁸. Jedoch kommt es nach Dekompressionsoperationen immer wieder zu iatrogenen Instabilitäten. Alternativ zur klassischen Stabilisierung mit Pedikelschrauben wurden auch interspinöse Implantate zur Stabilisierung nach Dekompression untersucht und entsprechende Studien weisen vielversprechende Ergebnisse auf ³⁸.

2. Zielsetzung der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es Einflussfaktoren auf das klinische Resultat bei Patientinnen mit lumbaler SKS zu identifizieren und Möglichkeiten aufzuzeigen, um die Prognoseabschätzung oder auch das therapeutische Vorgehen zu optimieren. Gleichzeitig sollten unterschiedliche operative Behandlungsmöglichkeiten hinsichtlich ihrer Effektivität, Korrekturergebnisse, Folgepathologien und langfristigen Stabilität untersucht werden.

Die zervikale SKS führt häufig zu einer DZM, welche eine operative Dekompression unumgänglich macht. Je später die Operation durchgeführt wird desto schlechter ist die Prognose der Patienten. Hauptkriterium des therapeutischen Vorgehens ist die Wahl des richtigen operativen Verfahrens. Ob eine dorsale, eine ventrale oder auch eine kombinierte Dekompression favorisiert werden sollte, wurde bereits in multiplen Studien untersucht, ohne dass ein klarer Vorteil für ein bestimmtes Verfahren festgestellt und ein Standardverfahren definiert werden konnte. Das operative Vorgehen muss an die individuelle Pathologie angepasst werden in Abhängigkeit davon, ob die Kompression von ventral oder dorsal, mono- oder multisegmental führend ist. Wichtig für die Wahl des operativen Verfahrens und die Prognoseeinschätzung ist, dass die einzelnen operativen Techniken und ihr Langzeitergebnis hinsichtlich der klinischen Symptomatik, der Stabilität sowie der Rekonstruktionsmöglichkeiten untersucht und eingeordnet werden. Bei dorsalen Verfahren zur Behandlung der DZM ist die Variabilität der operativen Dekompression begrenzt. Die ventralen Dekompressionsmöglichkeiten weisen eine höhere Komplexität auf und sind bisweilen nur unzureichend untersucht worden. Die häufigsten operativen Techniken zur Dekompression an der Halswirbelsäule von ventral sind die ventrale Diskektomie und Fusion oder Implantation einer Bandscheibenprothese sowie die Korporektomie ¹²³.

Wichtig zur richtigen Indikationsstellung, Prognoseabschätzung und Aufklärung der Patientinnen ist es den Langzeitverlauf dieser Patientenkohorte zu kennen. Die Operationstechniken müssen hinsichtlich Ihrer klinischen Ergebnisse, ihrer Stabilität und auch der Rekonstruktionsergebnisse untereinander verglichen und validiert werden. Es gibt nur unzureichende Daten zum klinischen Verlauf der Patientinnen sowie zu Langzeitergebnissen des sagittalen Alignements und der Stabilität. Ziel dieser Arbeit war es die häufigsten ventralen operativen Verfahren wie die mono- und multisegmentale ventrale Diskektomie und die Korporektomie hinsichtlich ihrer Langzeitergebnisse zu vergleichen und validieren. Von Bedeutung sind in diesem Kontext insbesondere Komplikationen, objektivierbare klinische Parameter und Scores sowie bildgebende Ergebnisse der Operationen, welche longitudinal betrachtet und analysiert wurden.

Bei der lumbalen SKS sind die Ergebnisse eines operativen Vorgehens umfangreich untersucht worden. Trotz unterschiedlicher Operationstechniken profitieren ungefähr zwei Drittel der Patienten sehr gut, wenn der Spinalkanal dekomprimiert wird. Jedoch ist der Erfolg bei dreißig bis vierzig Prozent der Patienten eher begrenzt. Es ist ungeklärt, inwiefern die Prognose der Patientinnen durch pathoanatomische oder physiologische anatomische Faktoren beeinflusst wird. Welche diagnostischen Mittel können diese potentiellen Einflussfaktoren identifizieren und welche Strategien sollten zur Therapieoptimierung verfolgt werden?

Eine möglichst physiologische Rekonstruktion wird von vielen Autoren bei jeder Instrumentierung an spinalen Segmenten gefordert ^{85,133}. Der Einfluss des sagittalen Alignements auf das Ergebnis von Patienten mit SKS, welche eine Dekompression ohne Stabilisierung erhalten haben, ist bisher nicht untersucht worden. Die SKS kann neben einer ligamentären oder auch ossären Einengung auch durch Fett bedingt sein. Insbesondere vor dem Hintergrund der steigenden Anzahl an Patientinnen mit Übergewicht spielt die spinale Lipomatose hier eine immer größere Rolle bei der Behandlung von degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen. Diese wurde jedoch bisher nur in wenigen Fallberichten oder Fallserien untersucht ^{33,35}.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es bei Patienten mit lumbaler SKS, die eine mikrochirurgische Dekompression erhalten haben, anatomische Einflussfaktoren wie das sagittale Alignment zu identifizieren. Zusätzlich sollte die ursächliche Pathomorphologie der SKS auf das klinische Resultat, sowie Re-Operationsraten und Komplikationen untersucht werden.

3. Eigene Arbeiten

3.1 Ventrale Fusionsverfahren der Halswirbelsäule (Arbeit 1 und 2)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Operationstechniken zur Behandlung der degenerativen zervikalen Myelopathie hinsichtlich Ihrer Effektivität, Stabilität und Rekonstruktion im Langzeitverlauf untersucht. Der Fokus lag hierbei auf den ventralen Fusionsverfahren.

3.1.1 Interkorporelle Fusion bei Zervikaler Spinalkanalstenose (Arbeit 1)

Bayerl S, Wiendieck K, Koeppen D, Topalovic M, Übelacker A, Kroppenstedt S, Cabraja M (2013) Single- and multi-level anterior decompression and fusion for cervical spondylotic myelopathy--a long term follow-up with a minimum of 5 years. **Clin Neurol Neurosurg** **115**:1966–1971

<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2013.05.031>

Die operative Dekompression des zervikalen Spinalkanals kann häufig über einen anterioren Zugang mit Diskektomie und Fusion erfolgen. Auf Höhe der Bandscheibensegmente, wo sich bei den meisten Patientinnen die relevante SKS darstellt, kann der Spinalkanal hierdurch effektiv dekomprimiert werden. Bei dieser Art der operativen Fusion kommt es nur selten zu Komplikationen, welche die Patienten längerfristig beeinträchtigen. Gleichzeitig kommt es zu weniger Wundheilungsstörungen als bei dorsalen Dekompressionsverfahren³². Zur Risiko- und Ergebnisanalyse dieses operativen Verfahrens wurden Patientinnen mit monosegmentaler und multi-segmentaler DCM nach Ventraler Diskektomie und Fusion im Langzeitverlauf hinsichtlich klinischer und bildgebend-operativer Ergebnisse, der Häufigkeit einer Anschlussdegeneration, sowie der Komplikationsrate verglichen⁸⁸.

Der Großteil der Patienten mit DZM, der eine monosegmentale oder auch eine multisegmentale ventrale Diskektomie und Spondylodese mit oder ohne Plattenosteosynthese erhalten hat, profitierte von der operativen Dekompression. Die Anzahl der operierten Segmente hatte keinen Einfluss auf das Operationsergebnis, auf die Rate der Anschlussdegenerationen oder auf die Wahrscheinlichkeit einer Re-Operation im Langzeitverlauf. Die operative Dekompression führte sowohl zu einer Abnahme der Zervikobrachialgien als auch zu einer Besserung der fokalen neurologischen Defizite. Bei den Patientinnen mit monosegmentaler oder auch multisegmentaler Pathologie konnte durch die

interkorporelle Fusion eine Rekonstruktion der kyphotischen Fehlstellung der entsprechenden Segmente erreicht werden. Im Langzeitverlauf zeigte sich, dass die Anzahl der Cagesinterungen und auch der Pseudarthrosen von Patienten, die monosegmental operiert wurden, höher war und hierdurch auch die Kyphosierung der entsprechenden operierten Segmente wieder zunahm. Entsprechend kam es bei monosegmental operierten Patientinnen zu einer Re-Kyphosierung innerhalb der folgenden postoperativen Jahre. Bei multisegmental operierten Patienten, welche zumeist eine zusätzliche Plattenosteosynthese erhalten hatten, war der Lordoseverlust nach Rekonstruktion im Langzeitverlauf geringer. Diese bildgebenden Unterschiede spiegelten sich jedoch nicht im klinischen Verlauf der Patientinnen wider.

3.1.2 Zwei-Höhen-Korporektomie bei zervikaler Spinalkanalstenose (**Arbeit 2**)

Bayerl SH, Pöhlmann F, Finger T, Prinz V, Vajkoczy P (2018) Two-level cervical corpectomy-long-term follow-up reveals the high rate of material failure in patients, who received an anterior approach only. **Neurosurg Rev.** [Epub ahead of print]

<https://doi.org/10.1007/s10143-018-0993-6>

Die zervikale Korporektomie ist ein invasiveres operatives Verfahren als die Diskektomie und geht mit einer höheren Komplikationsrate einher¹²³. Sie wird deutlich seltener durchgeführt und ermöglicht die Dekompression des gesamten Verlaufs des Spinalkanals auch zwischen den Bandscheibensegmenten. Dieser Bereich kann über eine Diskektomie nicht erreicht werden⁸⁹. Durch diese Technik können Patienten mit langstreckiger zervikaler SKS oder verknöchertem hinteren Längsband und damit einhergehender DZM entlang des gesamten Duralschlauchs dekomprimiert werden⁸⁹. Auf diese Weise können bereits fusionierte Segmente adressiert werden. Mit dem Einbringen eines Cages kann häufig eine umfangreiche Korrektur des Alignements erreicht werden. Unter den ventralen operativen Verfahren ist die Zwei-Höhen-Korporektomie in Hinblick auf Effektivität, Sicherheit, Stabilität und Revisionsraten bisher nur in sehr kleinen Fallserien und nicht im Langzeitverlauf untersucht worden.

Die meisten Patientinnen mit zervikaler SKS, die zur Dekompression eine Zwei-Höhen-Korporektomie erhalten haben, erfuhren durch die Operation eine deutliche Besserung der klinischen Symptome. Die Zervikobrachialgien der Patienten waren rückläufig und auch die neurologischen Symptome bildeten sich deutlich zurück. Ein Großteil der Patientinnen war mit dem operativen Ergebnis auch noch nach drei Jahren zufrieden. Die Operation führte zu einer Zunahme der segmentalen zervikalen Lordose durch eine Verringerung der kyphotischen Fehlstellung. Im mehrjährigen Verlauf kam es teilweise zu einem Korrekturverlust im Vergleich zum postoperativen Ergebnis. Bei einer Ein-Höhen-Korporektomie ist bekannt, dass eine ventrale Plattenosteosynthese ohne zusätzliche dorsale Instrumentierung ausreichend ist. Im Rahmen dieser Studie zeigte sich, dass Patienten nach einer Zwei-Höhen-Korporektomie mit ventraler Plattenosteosynthese und ohne zusätzliche dorsale Stabilisierung eine hohe Rate an postoperativen Komplikationen durch Implantat-assoziierte Instabilität aufwiesen. Es kam zu Cage-Sinterungen und Cage-Dislokationen, welche teilweise zu einer klinischen Verschlechterung mit Schmerzexazerbation und Progredienz der fokal neurologischen Symptomatik führten. In einem Drittel der Fälle, musste eine Revisionsoperation durchgeführt werden, welche erneut zu einer Hospitalisierung der Patientinnen führte. Einige Patienten haben nach Zwei-Höhen-Korporektomie primär eine zusätzliche dorsale Stabilisierung

erhalten, sodass ein direkter Vergleich von Patientinnen mit und ohne 360°-Stabilisierung erfolgen konnte. Nach Zwei-Höhen-Korporektomie mit additiver dorsaler Stabilisierung kam es nicht einem Fall zu Materialfehlern im Sinne von Cage-Dislokationen, oder -Sinterungen. Im Langzeitverlauf zeigte sich in dieser Gruppe ein besseres neurologisches Ergebnis. Die Erfolgsrate des ventro-dorsalen Eingriffs lag bei nahezu 90%, wohingegen die Erfolgsrate des rein ventralen Eingriffs deutlich darunter lag (60%). Dieses Ergebnis zeigt eindrücklich, dass Revisionsoperationen und ein klinischer Progress verhindert werden kann, wenn eine Zwei-Höhen-Korporektomie mit dorsaler Instrumentierung kombiniert wird.

3.2 Einflussfaktoren bei der lumbalen Spinalkanalstenose (Arbeit 3, 4 und 5)

Etwa zwei Drittel der Patientinnen, die aufgrund einer lumbalen SKS operiert werden müssen, profitieren deutlich und langfristig von der Dekompression des Duralschlauchs¹⁴⁶. Die Ursache für die Versagerrate von dreißig bis vierzig Prozent ist jedoch ungeklärt. Ein Faktor könnten die sagittalen spino-pelvinen Parameter sein, welche einen großen Einfluss auf unterschiedliche degenerative Pathologien¹³⁰ und klinische Ergebnisse nach spinalen Eingriffen haben können⁸². Die Relevanz der spino-pelvinen Parameter für die klassische degenerative lumbale SKS wurde vor der Gewinnung der Daten aus Arbeit 3 und 4 nicht untersucht.

3.2.1 Einfluss der Sagittalen Balance auf das operative Ergebnis von Patientinnen mit lumbaler Spinalkanalstenose (Arbeit 3)

Bayerl SH, Pöhlmann F, Finger T, Onken J, Franke J, Czabanka M, Woitzik J, Vajkoczy P
(2015) The Sagittal Balance Does not Influence the 1 Year Clinical Outcome of Patients With Lumbar Spinal Stenosis Without Obvious Instability After Microsurgical Decompression. **Spine (Phila Pa 1976)** 40:1014–1021

<https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000000928>

Die symptomatische lumbale SKS, begleitet von Claudicatio-spinalis-Symptomatik sowie belastungsabhängigen Rückenschmerzen geht häufig mit degenerativen Veränderungen einher, welche zu einer sagittalen Dysbalance führen. Die Diagnose der Dysbalance wird anhand von Röntgenaufnahmen der gesamten Wirbelsäule im Stehen gestellt. Wenn keine Makroinstabilität vorliegt kann eine operative Dekompression ohne Instrumentierung erwogen werden. Im Verlauf des ersten postoperativen Jahres gab es keinen Hinweis darauf, dass die Ausprägung der sagittalen Dysbalance hierbei das klinische Ergebnis signifikant beeinflusst hat. Patientinnen, die in der sagittalen Balance (SB) waren, profitierten von der operativen Dekompression im gleichen Maße wie Patientinnen, die eine mittel- oder hochgradige sagittale Dysbalance aufwiesen. Nicht nur die Beinschmerzen und die Claudicatio spinalis zeigte bei allen Gruppen den gleichen Verlauf, auch der Rückenschmerz und die schmerz-assoziierte Einschränkungen unterschieden sich nicht in Abhängigkeit von der SB. Die steigende Lebensqualität untermauerte den Therapienutzen durch die Operation. Auch die Patientenzufriedenheit mit dem operativen Eingriff war hoch und vergleichbar mit Ergebnissen von größeren randomisierten Studien, wobei die SB keinen relevanten Einfluss hatte.

3.2.2 Einfluss des Sagittalen Profils auf das operative Ergebnis von Patienten mit lumbaler Spinalkanalstenose (**Arbeit 4**)

Bayerl SH, Pöhlmann F, Finger T, Franke J, Woitzik J, Vajkoczy P (2017) The sagittal spinal profile type: a principal precondition for surgical decision making in patients with lumbar spinal stenosis. **J Neurosurg Spine** 27:552–559

<https://doi.org/10.3171/2017.3.SPINE161269>

Neben der SB spielt das sagittale Profil eine Rolle für die Ausbildung bestimmter degenerativer Prozesse¹³¹. Der Einfluss des sagittalen Profils auf einige degenerative spinale Pathologien wurde bereits festgestellt¹³⁰. Bislang nicht untersucht wurde die Rolle des SP auf das klinische Ergebnis der degenerativen lumbalen SKS nach mikrochirurgischer Dekompression.

Das Sagittale Profil wurde von Roussouly in vier unterschiedliche Typen eingeteilt (SPT 1-4), die sich hinsichtlich ihres spino-pelvinen Alignements und deren Belastungsmuster unterscheiden^{17,112,113}. Das Verteilungsmuster der unterschiedlichen SPTs in der Normalbevölkerung unterscheidet sich von symptomatischen Patientinnen mit lumbaler SKS³. Bei Spinalkanalstenosen fand sich deutlich häufiger der SPT 1 und der SPT 4. Das klinische Resultat nach mikrochirurgischer Dekompression mono- oder multisegmentaler SKS wurde durch das präoperative sagittale Profil signifikant beeinflusst. Es konnte kein Unterschied zwischen der Ausprägung der präoperativen Schmerzsymptomatik oder Einschränkung im Alltag bei unterschiedlichem SPT festgestellt werden. Jedoch wies der Typ SPT 1 nach Roussouly ein schlechteres postoperatives Ergebnis auf. Die rein dekompressive Operation bei Patienten mit einer starken Lordose in der unteren Lendenwirbelsäule und einer ausgeprägten thorakolumbalen Kyphose – entsprechend dem SPT 1 - bewirkte keine signifikante klinische Verbesserung der Rückenschmerzen im Gegensatz zu Patientinnen mit divergentem SPT als Grundvoraussetzung. Die Dekompression der Cauda Equina und der abgehenden Nervenwurzeln auf Höhe der lumbalen SKS führt bei allen Patienten – unabhängig vom sagittalen Profil – zu einer Abnahme der Beinschmerzen. Auch die Gehstrecke und somit die Claudicatio spinalis entwickelte sich nach mikrochirurgischer Dekompression positiv. Anders verhält es sich mit der Rückenschmerzsymptomatik. Patientinnen mit SPT 1 erfahren keine hinreichende Besserung der Lumbago. Sie geben auch ein Jahr nach der Operation signifikant höhere Schmerzlevel an als Patienten mit anderem SPT. Daraus resultiert auch eine deutliche funktionelle Einschränkung der Patientinnen im Alltag. Zudem wird die Lebensqualität negativ beeinträchtigt und die Patienten mit SPT 1 sind entsprechend seltener mit dem klinischen Resultat der Operation zufrieden. Bei weniger als

fünfundfünfzig Prozent konnte in dieser Gruppe die chirurgische Dekompression als erfolgreich angesehen werden, wohingegen siebenzig bis achtzig Prozent der Patientinnen mit anderen SPTs mit Erfolg operiert werden konnten. Die einzelnen spinopelvinen Parameter waren nicht von relevanter Bedeutung für das postoperative klinische Resultat der lumbalen SKS.

3.2.3 Spinalkanalstenose bei lumbaler epiduraler Lipomatose – Ätiologie, Symptome, operative Behandlung und Prognose (**Arbeit 5**)

Bayerl SH, Dinkelbach M, Heiden P, Prinz V, Finger T, Vajkoczy P (2018) Treatment results for lumbar epidural lipomatosis: Does fat matter? **Eur Spine J.** [Epub ahead of print]

<https://doi.org/10.1007/s00586-018-5771-1>

Die spinale Lipomatose als Ursache der lumbalen SKS stellt eine deutlich seltenere Entität als die Osteochondrose sowie ligamentäre Hypertrophie dar. Nichtsdestotrotz sieht jeder Wirbelsäulenchirurg regelmäßig Patienten mit LEL und typischen Symptomen vergleichbar mit denen einer klassischen SKS. Die wissenschaftliche Beratungsgrundlage ist in dieser Situation sehr dünn. Weder konservative noch operative Maßnahmen haben eine Evidenzklasse, welche für eine Therapieempfehlung ausreicht und die Basis der Beratung beruht nur auf Fallberichten oder sehr kleinen Fallserien^{33,36}.

Die symptomatische LEL wurde prospektiv hinsichtlich ihres klinischen postoperativen Verlaufs untersucht. Das klinische Resultat wurde wiederum mit dem Ergebnis von der klassischen osteoligamentären SKS verglichen.

Die Patientinnen mit symptomatischer LEL waren in ihrer Mobilität signifikant eingeschränkt. Sie litten unter Beinschmerzen, Rückenschmerzen, einer limitierten Gehstrecke und daraus folgte eine relevante funktionelle Einschränkung im Alltag. Die Lebensqualität war hierdurch stark beeinträchtigt. Die symptomatische LEL zeigte eine hohe Assoziation zur Adipositas und entsprechend einem deutlich gestörten Fettstoffwechsel, welcher medikamentös behandelt werden musste. Typische, potentiell ursächliche Komorbiditäten der LEL waren zudem neben dem metabolischen Syndrom, der Morbus Cushing, die Hypothyreose und Autoimmunerkrankungen mit Glukokortikoidtherapie. Eine mikrochirurgische Dekompression bei symptomatischer LEL konnte bei den meisten Patienten über eine erweiterte interlaminäre Fensterung oder auch eine Hemilaminektomie erfolgen. Komplikationen waren selten und meist ohne persistierendes neurologisches Defizit. Die Patientinnen profitierten von der Dekompression hinsichtlich ihrer Rückenschmerzen und Beinschmerzen. Konsekutiv verbessert sich die Gehstrecke und die Patienten gaben eine deutlich höhere Mobilität im Alltag und eine Verbesserung der Lebensqualität an. Dieser Effekt konnte auch im Langzeitverlauf beobachtet werden. Nach drei Jahren lag der Erfolg der Operation bei über siebenzig Prozent.

Die Resultate der mikrochirurgischen Dekompression bei LEL waren mit denen der osteoligamentären SKS vergleichbar. Die Patienten profitieren im gleichen Maße hinsichtlich ihrer Bein- und Rückenschmerzsymptomatik und ihrer alltäglichen Einschränkung sowie der

Lebensqualität. Auch die peri-operativen Risiken der Operation unterscheiden sich nicht in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Pathomorphologie, welche die SKS verursacht hat.

4. Diskussion

In dieser Habilitationsschrift wurden unterschiedliche anatomische und technische Einflussfaktoren auf operative Therapiemöglichkeiten der degenerativen SKS untersucht.

Bei der degenerativen SKS der Halswirbelsäule wurden unterschiedliche Fusionsverfahren miteinander verglichen und deren Langzeitergebnis hinsichtlich ihrer Effektivität, ihrem Risikoprofil und ihrer Stabilität analysiert. Hierbei konnten Stärken und Schwächen unterschiedlicher ventraler Fusionsverfahren identifiziert werden und den Wirbelsäulenchirurgen eine bessere Grundlage zur Diagnosestellung, Aufklärung der Patientinnen und technischen Ausführung der Operation gelegt werden.

Bei Patienten mit degenerativer SKS der Lendenwirbelsäule wurde der Einfluss der Stellung von Wirbelsäule und Becken sowie der Einfluss der verursachenden Pathologie für die SKS auf das operative Ergebnis der Patientinnen untersucht. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse können einen Beitrag zur präzisen chirurgischen Indikationsstellung und chirurgischen Aufklärung leisten.

4.1 Ventrale zervikale Fusionsverfahren – Sicherheit, Effektivität und Stabilität im Langzeitverlauf

Ventrale Fusionsverfahren der Halswirbelsäule haben den Vorteil, dass bei der Operation die autochthone Rückenmuskulatur komplett intakt bleibt und die Fusion meist über einen relativ kleinen Zugangsweg erfolgen kann. Gleichzeitig kann durch die Möglichkeit einer interkorporellen Fusion eine effiziente Rekonstruktion erfolgen, welche gegenüber dorsalen Fusionsverfahren überlegen ist ⁵⁶. Die Risiken der entsprechenden Operationen bestehen vornehmlich aus Schluckstörungen und Heiserkeit, peri-operativen kardiopulmonalen Komplikationen, einer klinisch-neurologischen Exazerbation der Myelopathie, einer Parese des Spinalnerven C5, einer epiduralen Nachblutung, einer Liquorfistel, einer Wundheilungsstörung oder -infektion, einer Materialdislokation, die zu einer Instabilität und klinischen Verschlechterung führen kann ³².

Die ventrale Dekompression der symptomatischen zervikalen SKS erfolgt am häufigsten über eine ventrale Diskektomie ¹³⁴. Meist wird bei einer degenerativen SKS eine Fusion angestrebt, für welche die Implantation eines Cages und gegebenenfalls eine zusätzliche Plattenosteosynthese zur Stabilisierung der Segmente erfolgt ⁹⁴. Bei einer monosegmentalen ventralen Diskektomie und Fusion genügt ein Stand-alone Cage ohne Plattenosteosynthese ^{27,95,119}. Es kommt hierbei nur sehr selten zu einer Cage-Sinterung und diese ist für den Patienten meist nicht klinisch relevant und bedarf keiner weiteren Intervention ¹³². Durch die

Implantation einer zusätzlichen ventralen Platte steigt jedoch das Operationsrisiko leicht an ⁹⁵. Die Operation hat ein niedriges Risikoprofil und die Ergebnisse der Arbeit 1 decken sich dahingehend mit vorausgegangen Studien ¹²⁷. Das klinische Resultat zeigte nach Verlaufskontrollen über mehr als fünf Jahre gute Ergebnisse und Anschlussdegenerationen traten nur in wenigen Fällen auf. In über achtzig Prozent konnte das operative Ergebnis auch nach fünf Jahren als erfolgreich eingestuft werden.

Durch die interkorporelle Fusion kam es zu einer Zunahme der Lordose des entsprechenden Segments, welche dazu beitrug der degenerativen Kyphosierung entgegenzuwirken. Jedoch kam es im Langzeitverlauf wiederum zu einem Verlust der Lordose, höchstwahrscheinlich damit zusammenhängend, dass nur in wenigen Fällen eine zusätzliche ventrale Plattenosteosynthese erfolgt ist ¹⁵².

Bei der multisegmentalen ventralen Diskektomie und Fusion wurde häufiger eine zusätzliche Plattenosteosynthese durchgeführt. Bei bisegmentalen Pathologien ist die Plattenosteosynthese optional. Bei trisegmentalen Befunden oder noch längerstreckigen Pathologien wird von vielen Autoren eine Plattenosteosynthese empfohlen ^{93,120}.

Auch bei der multisegmentalen ventralen Diskektomie war das peri-operative Risiko niedrig und die Patientinnen profitierten langfristig von der dekompressiven Operation. Zumeist erfolgte eine zusätzliche ventrale Plattenosteosynthese. Durch die mehrsegmentale interkorporelle Fusion konnte die segmentale Lordose rekonstruiert werden. Der Gewinn an Lordose blieb bei den Patienten für mehr als fünf Jahre bestehen. Die Plattenosteosynthese hat hier mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Erhalt der Lordose beitragen ⁹³. Es scheint hierdurch auch zu einer niedrigeren Rate von Cage-Sinterungen gekommen zu sein ¹⁵².

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Patientinnen mit multisegmentaler zervikaler SKS genau wie Patienten mit monosegmentaler SKS durch eine ventrale Diskektomie und Fusion sicher und effektiv therapiert werden können. Unterschiede hinsichtlich Komplikationen oder auch hinsichtlich der klinischen Verbesserung gab es nicht. Nur die segmentale Lordose konnte besser und langfristiger durch die multisegmentale Operation gewährleistet werden, ohne dass eine klinische Relevanz festgestellt werden konnte.

Bei den ventralen Fusionsverfahren von degenerativen SKS ist die Korporektomie ein seit vielen Jahren etabliertes Vorgehen, welche eine umfangreiche Rekonstruktion sowie eine langstreckige Dekompression ermöglicht. Es muss jedoch nur in Ausnahmefällen angewendet werden, da meist eine dorsale Dekompression erfolgen kann oder eine die Diskektomie zur Dekompression ausreicht, welche ein geringeres operatives Risiko birgt ^{45,73,123}. Aufgrund der niedrigen Fallzahlen ist die Korporektomie wissenschaftlich noch nicht ausreichend untersucht worden.

Da bei dieser Operation ein Großteil des Wirbelkörpers reseziert wird sowie das vordere und hintere Längsband durchtrennt werden, muss die vordere Säule allein durch das implantierte Material getragen werden. Bei einer Korporektomie werden immer mehrere Segmente adressiert und aufgrund der Länge des Konstrukts kommt es erst spät und in einzelnen Fällen niemals zu einer knöchernen Fusion^{15,60,74,102}. Es ist evident, dass eine Hauptkomplikation der Operation die Instabilität der ventralen Instrumentierung darstellt^{15,21,74,117,121,137,140,144}. Am häufigsten wird die Korporektomie eines Wirbelkörpers mit zusätzlicher ventraler Plattenosteosynthese durchgeführt. Hierbei kommt es zu guten klinischen Ergebnissen mit nur sehr geringen Revisionsraten^{21,143}. Bei Korporektomien mehrerer Wirbelkörper steigt das Risiko einer Materialinsuffizienz, wenn eine Korporektomie mit Cage-Implantation und Plattenosteosynthese nur von ventral durchgeführt wird^{21,117,143}. Sobald 3-Höhen korporektomiert werden müssen, ist die Materialfehlerrate so hoch, dass eine zusätzliche dorsale Instrumentierung zur Stabilisierung erforderlich ist (Literatur). Darüber besteht weitestgehend Konsens.^{1,21,61,117} Bei der Zwei-Höhen-Korporektomie ist die Studienlage weniger eindeutig. Einige Chirurgen beschreiben einen sehr hohen Anteil an Patientinnen mit Materialdislokation, andere beschreiben wiederum eine niedrigere Dislokationsrate und halten eine dorsale Spondylodese nach Zwei-Höhen-Korporektomie für nicht notwendig^{75,83,117,140}. Im Rahmen dieser Arbeit konnte erstmalig ein direkter Vergleich zwischen einer Zwei-Höhen-Korporektomie mit Stabilisierung und ohne dorsale Stabilisierung erfolgen. Eine Zwei-Höhen-Korporektomie mit ventraler Plattenosteosynthese birgt eine hohe Gefahr der Instabilität, wenn keine zusätzliche Stabilisierung von dorsal erfolgt. Es konnte bei einem Drittel der Patienten eine Instabilität nachgewiesen werden, welche eine zusätzliche, sekundäre dorsale Stabilisierung erforderte. Auch in der vorausgehenden Literatur werden Materialfehlerraten zwischen 6 und 67 % beschrieben. Konsekutiv empfehlen viele Autoren das Tragen von Zervikalstützen über mehrere Monate. Hierdurch wiederum tragen vor allem ältere Patientinnen ein zusätzliches Risiko¹⁰¹. In unseren Daten konnte gezeigt werden, dass der Weg über eine zusätzliche dorsale Instrumentierung das Risiko einer postoperativen Instabilität eklatant senken kann, keine risikobehafteten Zervikalstützen erforderlich werden und kaum materialbedingte Revisionen notwendig sind. Nach rein ventraler Operation entstandene Instabilitäten führten zu einer klinischen Verschlechterung der Schmerzsymptomatik sowie der neurologischen Symptomatik. Hingegen konnte mit der 360°-Stabilisierung das neurologische Ergebnis langfristig optimiert werden. Das zusätzliche Risiko der dorsalen Instrumentierung fiel überraschenderweise nicht ins Gewicht. Die dorsale Spondylodese mit Massa lateralis- oder Pedikelschrauben konnte ohne Dekompression oder auch Rekonstruktion sehr zügig und komplikationsarm durchgeführt werden. Bei höheren

Fallzahlen muss jedoch von einem leicht erhöhten peri-operativen Risiko insbesondere hinsichtlich Wundheilungsstörungen ausgegangen werden.

Wir empfehlen daher nach einer Korporektomie von zwei oder mehr Wirbelkörpern eine zusätzliche dorsale Instrumentierung um die Stabilität des Konstrukts zu gewährleisten und das gute klinische Ergebnis mittelfristig nicht zu gefährden.

4.2 Anatomische und pathologische Einflussfaktoren auf das operative Ergebnis von Patientinnen mit lumbaler Spinalkanalstenose

Etwa zwei Drittel der Patientinnen, die aufgrund einer lumbalen SKS operiert werden profitieren langfristig und signifikant von der chirurgischen Dekompression¹⁴⁶. Die Ursache für die Versagerrate von 30-40% ist ungeklärt. Die sagittalen spino-pelvinen Parameter haben großen Einfluss auf die Symptomatik von Patienten unterschiedlicher Pathologien. Durch die Dysbalance kommt es zu einer muskuloskeletalen Belastung, die häufig zu einem ausgeprägten Schmerzsyndrom führt und so zu einer Einschränkung der Funktionabilität, der Mobilität und der Lebensqualität der Patientinnen^{43,59,72}. Insbesondere wenn eine Instrumentierung notwendig ist, sollte die sagittale Dysbalance berücksichtigt werden.^{10,70} In den letzten Jahren ist die SB in den Fokus der Wirbelsäulen Chirurgie auch außerhalb der klassischen Deformitäten Chirurgie gerückt. Es wurde vielfach propagiert, dass eine Wiederherstellung der SB bei einem operativen Eingriff für den klinischen Erfolg essentiell ist^{12,67-70,80,104,125,151}. In den letzten Jahren kam es zu einer deutlichen Zunahme von komplexen Eingriffen an der degenerativen Wirbelsäule^{13,19,22,99}. Wir sehen jedoch, dass es gehäuft im fortgeschrittenen Alter auch ohne Beschwerden zu einer sagittalen Dysbalance kommt⁴⁹. Gleichzeitig ist der Zusammenhang zwischen der Lebensqualität von Patienten und der SB umstritten²⁸. Auch eine Korrektur der SB, bei führender monosegmentaler Pathologie und der Notwendigkeit einer Instrumentierung wird kontrovers diskutiert⁶². Insofern muss geprüft werden, ob der Trend nicht zu einer Pathologisierung eines physiologischen Alterungsprozesses führt.

Im Rahmen der oben aufgeführten Studien konnte gezeigt werden, dass Patientinnen mit einer symptomatischen SKS, die einer operativen Dekompression bedürfen unabhängig von der globalen SB rein mikrochirurgisch operiert werden können. Auch die Patienten mit einer dekompensierten sagittalen Dysbalance, Rücken- und Beinschmerzen profitieren von dem Eingriff, obwohl die Dysbalance nicht adressiert wurde. In den auf diese Daten folgenden Studien konnte das Ergebnis weitestgehend bestätigt werden⁴⁷. Die nachfolgenden Studien konnten demonstrieren, dass die SB die Versagerrate nach mikrochirurgischer Dekompression nicht ausreichend erklärt. Teilweise zeigt sich in postoperativen

Röntgenbildern, dass ein Teil der sagittalen Dysbalance durch eine Kompensationshaltung bei lumbaler SKS entsteht und es sich nicht wirklich um eine Deformität handelt ^{16,79}. Allenfalls konnte eine etwas stärkerer postoperativer Rückenschmerz beobachtet werden, ohne dass dieser eine klinische Relevanz aufwies ^{18,47}. Die SB spielt demzufolge nur eine untergeordnete Rolle für dieses Krankheitsbild, wenn keine Fixierung durch eine Spondylodese lumbaler Segmente erfolgen muss .

Neben der globalen SB gibt es jedoch weitere spino-pelvine Parameter, die die Stellung der Hüfte, des Kreuzbeins sowie der Lendenwirbelsäule beschreiben und einen Einfluss auf spinale Pathologien haben. Neben singulären Parametern wie der lumbalen Lordose oder auch des C7-Lotes kann auch das gesamte Profil der Wirbelsäule betrachtet werden. Nachdem Roussouly das sagittale Profil in vier unterschiedliche sagittalen Profiltypen eingeteilt hatte, wurde ihr Einfluss auf Degenerationsprozesse und auch auf das Resultat unterschiedlicher degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen untersucht ^{129,130}. Durch eine Variabilität der Ausprägung der Lendenlordose sowie der Neigung des Beckens kommt es zu unterschiedlichen Belastungsmustern. Bei dem SPT 1 liegt eine ausgeprägte Lordose in den unteren Segmenten der Lendenwirbelsäule vor und eine lange thorakolumbale Kyphose führt zu einer starken dorsalen Belastung auf Höhe dieser lordotischen Segmente ^{112,113}. Bei einer mikrochirurgischen Dekompression erfolgt der Zugang zu diesen lordotischen Segmenten von dorsal. Hierdurch entsteht ein muskuläres Trauma und es kommt zu einer Schwächung der hinteren Säule. Diese Patientinnen beklagten nach der Dekompression vermehrt Rückenschmerzen und weniger als die Hälfte der Patienten war mit dem operativen Resultat zufrieden. Diese Patientinnen unterschieden sich hinsichtlich des postoperativen Ergebnisses deutlich von Patienten mit anderen SPTs. Hierdurch konnte eine Subgruppe von Patientinnen identifiziert werden, die deutlich seltener von einer mikrochirurgischen Dekompression profitieren und häufig weiterhin unter persistierenden Rückenschmerzen leiden. Im Langzeitverlauf werden wir von der klinischen Entwicklung dieser Patienten berichten können und beobachten, ob sich dieser relevante klinische Unterschied aufgrund des sagittalen Alignements bestätigen lässt. In diesem Fall sollte bei dieser Patientengruppe über alternative Behandlungsmöglichkeiten nachgedacht werden und neben einer prolongierten konservativen Therapie auch eine dorsale Stabilisierung in Betracht gezogen werden.

Ein wichtiger Einflussfaktor für die spinale Degeneration ist Übergewicht ^{42,110,124,128}. Patientinnen mit Adipositas haben eine etwas eingeschränkte Prognose, wenn sie wegen einer SKS dekomprimiert werden müssen. Trotzdem profitiert auch diese Patientengruppe besser von der operativen als von der konservativen Therapie ¹⁰⁰. In MRT-Aufnahmen von Patientinnen mit Wirbelsäulen-assoziierten Erkrankungen wird neben einer ossären und

ligamentären Einengung des Spinalkanals auch in einigen Fällen eine lipomatöse Einengung festgestellt ⁸¹. Auf der Basis der aktuellen Literatur ist es schwierig die klinische Relevanz und die Erfolgsaussichten klassischer Therapiekonzepte bei der spinalen epiduralen Lipomatose abzuschätzen. Die häufigste Form der symptomatischen spinalen Lipomatose ist die LEL. Es wurde in Fallberichten und kleineren Fallserien beschrieben, dass die LEL zu einer Claudiatio Spinalis, zu radikulären Schmerzen, Rückenschmerzen und neurologischen Defiziten führen kann, so dass das Spektrum der Symptome dem der klassischen osteoligamentären SKS entspricht ^{33,35}. Die meisten Autoren empfehlen eine kausale Therapie der Lipomatose, unter anderem eine Diät, Kortikosteroid-sparende Therapiemöglichkeiten oder gegebenenfalls eine operative Hypophysenadenomresektion ^{11,29}. In vielen Fällen verlaufen diese therapeutischen Maßnahmen jedoch frustan und manchmal sind die Symptome der Patienten so ausgeprägt, dass eine operative Dekompression erforderlich wird ³⁵. Weiterhin gibt es kaum wissenschaftliche Evidenz für konservative Maßnahmen oder operative Behandlung. Prospektiv wurde bisher keine Patientenkohorte untersucht. Mit den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten ist es nun möglich die Patientinnen mit symptomatischer LEL hinsichtlich ihrer Symptome besser einzuordnen. Die Patienten unterschieden sich hinsichtlich Rücken-, Beinschmerzen, alltäglichen Einschränkungen und auch Lebensqualität nicht von denen mit osteoligamentärer Stenose. Auch die mikrochirurgische Dekompression hatte einen vergleichbaren Effekt. Sowohl Bein-, als auch Rückeschmerzen waren signifikant rückläufig und die Patientinnen profitierten auch im mehrjährigen Verlauf von der Dekompression hinsichtlich Mobilität und Lebensqualität. Die Operation hatte das gleiche Risikoprofil wie der Eingriff an der osteoligamentären SKS und kann somit Patienten mit therapierefraktärer symptomatischer LEL empfohlen werden. Inwiefern eine gezielte konservative Therapie ein ähnlich positives Ergebnis erzielen kann bleibt abzuwarten und wurde bisher nicht untersucht. Sicherlich ist der nächste Schritt eine Vergleichende Studie aufzusetzen. Hierdurch könnte die konservative Therapieoption insbesondere für LEL-Patientinnen mit nur milder Symptomatik oder auch für Patienten mit einem hohen peri-operativen Risiko als alternative Behandlung geprüft werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die symptomatische degenerative SKS ist ein Krankheitsbild mit hoher Inzidenz und führt häufig im höheren Lebensalter zu einer massiven Einschränkung der Lebensqualität bis hin zu einer kompletten Immobilität. Ein suffizientes Therapiekonzept für diese Patientinnen beinhaltet die richtige Diagnostik, die Identifizierung der zugrundeliegenden Pathologie sowie die individuelle Anpassung des Vorgehens an den klinischen Status und die Erwartungen der Patienten sowie Chancen und Risiken der Therapie.

Schweren schmerzbedingte oder neurologische Einschränkungen bedürfen häufig eines operativen Vorgehens. Nur durch das operative Vorgehen kann eine mechanische Dekompression der nervalen Strukturen erreicht und so eine dauerhafte Symptomlinderung ermöglicht werden.

Insbesondere bei einer Dekompression des Myelons der Halswirbelsäule muss häufig eine Spondylodese erfolgen. Die gängigen operativen Stabilisierungen mittels Diskektomie oder Korporektomie stellen hierbei ein sicheres Verfahren dar und auch im Langzeitverlauf führt die Dekompression zu einer klinischen Verbesserung. Bei multisegmentaler VDE sollte eine Plattenosteosynthese angestrebt werden, bei multisegmentaler Korporektomie sollte zusätzlich zur Plattenosteosynthese bereits ab einer Zwei-Höhen-Korporektomie eine zusätzliche dorsale Spondylodese erfolgen, um die Stabilität zu gewährleisten und neurologische Folgeschäden zu vermeiden. Ob und inwiefern Fortschritte in Form neuer Implantate oder operativer Techniken einen zusätzlichen, mit Komplikationen einhergehenden Zugang obsolet werden lassen, müssen zukünftige Studien zeigen.

Bei der lumbalen SKS muss häufig keine Fusion angestrebt werden. Vielmehr ist die reine Dekompression von dorsal ausreichend, um eine deutliche Symptomlinderung bei den meisten Patientinnen zu erreichen. Einfluss auf das klinische Ergebnis hat nicht die Ätiologie der komprimierenden Strukturen an sich. Die klinische Verbesserung nach dekompressiver Operation stellt sich unabhängig davon ein, ob die Kompression ligamentär, ossär oder auch lipomatös entstanden ist. Spinale Lipomatosen haben die gleiche Prognose wie lumbale osteoligamentäre SKS. Jedoch spielen anatomische Grundvoraussetzungen bei diesen Patienten eine große Rolle für den klinischen Erfolg eines operativen Verfahrens. Im Vordergrund steht hier jedoch nicht die präoperative globale SB, sondern viel mehr das sagittale Profil der Wirbelsäule, welches die Patientin mitbringt. Dieses bestimmt die Stellung und Belastung der Segmente und führt hierdurch zu einer speziellen Belastung einzelner Wirbelsäulenabschnitte. Im Vordergrund scheint hierbei insbesondere die Belastung der dorsalen Strukturen zu stehen, welche bei dem Sagittalen SPT 1 besonders hoch im Bereich der unteren Lendenwirbelsäule ist. Hier können Schmerzsyndrome entstehen, deren genaue

Ursache und Therapie noch nicht verstanden sind und weiterer Untersuchungen bedürfen. Auch wird eine prospektive Beobachtung dieser Patienten zeigen, wie sich das sagittale Alignment entwickelt und welchen Einfluss es auf den klinischen Verlauf der Patientinnen hat. Für die wissenschaftliche Vertiefung des Verständnisses für Schmerzsyndrome bei degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen sollte auch weiterhin die anatomischen Grundvoraussetzungen und die Stellung der Wirbelsäule betrachtet werden.

Schließlich ist die Ursachensuche von Schmerzsyndromen anhand der Stellung der Wirbelsäule komplex und noch nicht umfassend verstanden. „Fehl“-Stellungen durch altersbedingte Degeneration können mitunter physiologisch sein. Es muss immer streng geprüft werden, welche Operationsindikation und welcher Operationsumfang gerechtfertigt sind. Risikogruppen sollten identifiziert werden und Patienten so detailliert wie möglich das Risiko-Nutzenverhältniss einer Operation dargelegt werden können. Es wird zukünftig kein Weg daran vorbeiführen, dass konservative wie operativen WirbelsäulentherapeutenInnen ihr Wissen hinsichtlich der einzelnen Verfahren vertiefen und ein evidenz-basiertes patientenzentriertes Therapiekonzept entwickeln.

6. Literaturverzeichnis

1. Acosta FL, Aryan HE, Chou D, Ames CP: Long-term biomechanical stability and clinical improvement after extended multilevel corpectomy and circumferential reconstruction of the cervical spine using titanium mesh cages. **J Spinal Disord Tech** 21:165–174, 2008
2. Alyas F, Connell D, Saifuddin A: Upright positional MRI of the lumbar spine. **Clin Radiol** 63:1035–1048, 2008
3. Araújo F, Lucas R, Alegrete N, Azevedo A, Barros H: Individual and contextual characteristics as determinants of sagittal standing posture: a population-based study of adults. **Spine J** 14:2373–83, 2014
4. Ashana AO, Ajiboye RM, Sheppard WL, Sharma A, Kay AB, Holly LT: Cervical Paraspinal Muscle Atrophy Rates Following Laminoplasty and Laminectomy with Fusion for Cervical Spondylotic Myelopathy. **World Neurosurg** 107:445–450, 2017
5. Asher AL, Devin CJ, Kerezoudis P, Chotai S, Nian H, Harrell Jr. FE, et al: Comparison

- of Outcomes Following Anterior vs Posterior Fusion Surgery for Patients With Degenerative Cervical Myelopathy: An Analysis From Quality Outcomes Database. **Neurosurgery** **0**:1–8, 2018
6. Atlas SJ, Keller RB, Wu YA, Deyo RA, Singer DE: Long-term outcomes of surgical and nonsurgical management of lumbar spinal stenosis: 8 to 10 year results from the Maine lumbar spine study. **Spine (Phila Pa 1976)** **30**:936–943, 2005
 7. Bajwa NS, Toy JO, Young EY, Ahn NU: Establishment of parameters for congenital stenosis of the cervical spine: an anatomic descriptive analysis of 1,066 cadaveric specimens. **Eur Spine J** **21**:2467–74, 2012
 8. Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW: Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. **J Bone Joint Surg Am** **72**:403–8, 1990
 9. Boehm H, Greiner-Perth R, El-Saghir H, Allam Y: A new minimally invasive posterior approach for the treatment of cervical radiculopathy and myelopathy: surgical technique and preliminary results. **Eur Spine J** **12**:268–273, 2003
 10. Boody BS, Rosenthal BD, Jenkins TJ, Patel AA, Savage JW, Hsu WK: Iatrogenic Flatback and Flatback Syndrome: Evaluation, Management, and Prevention. **Clin spine Surg** **30**:142–149, 2017
 11. Borstlap ACW, van Rooij WJJ, Sluzewski M, Leyten ACM, Beute G: Reversibility of lumbar epidural lipomatosis in obese patients after weight-reduction diet. **Neuroradiology** **37**:670–673, 1995
 12. Bourghli A, Aunoble S, Reebye O, Le Huec JC: Correlation of clinical outcome and spinopelvic sagittal alignment after surgical treatment of low-grade isthmic spondylolisthesis. **Eur Spine J** **20**:1–6, 2011
 13. Bracken MB, Shepard MJ, Collins WF, Holford TR, Baskin DS, Eisenberg HM, et al: Methylprednisolone or naloxone treatment after acute spinal cord injury: 1-year follow-up data. Results of the second National Acute Spinal Cord Injury Study. **J Neurosurg** **76**:23–31, 1992
 14. BRAIN WR, NORTHFIELD D, WILKINSON M: The neurological manifestations of cervical spondylosis. **Brain** **75**:187–225, 1952
 15. Brenke C, Fischer S, Carolus A, Schmieder K, Ening G: Complications associated with cervical vertebral body replacement with expandable titanium cages. **J Clin Neurosci**

32:35–40, 2016

16. Buckland AJ, Vira S, Oren JH, Lafage R, Harris BY, Spiegel MA, et al: When is compensation for lumbar spinal stenosis a clinical sagittal plane deformity? **Spine J** **16**:971–981, 2016
17. Chaléat-Valayer E, Mac-Thiong J-M, Paquet J, Berthonnaud E, Siani F, Roussouly P: Sagittal spino-pelvic alignment in chronic low back pain. **Eur Spine J** **20 Suppl 5**:634–40, 2011
18. Chang HS: Effect of Sagittal Spinal Balance on the Outcome of Decompression Surgery for Lumbar Canal Stenosis. **World Neurosurg** **119**:e200–e208, 2018
19. Cowan JA, Dimick JB, Wainess R, Upchurch GR, Chandler WF, La Marca F: Changes in the utilization of spinal fusion in the United States. **Neurosurgery** **59**:15-20; discussion 15-20, 2006
20. Cunningham MR a, Hershman S, Bendo J: Systematic review of cohort studies comparing surgical treatments for cervical spondylotic myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** **35**:537–43, 2010
21. Daubs MD: Early failures following cervical corpectomy reconstruction with titanium mesh cages and anterior plating. **Spine (Phila Pa 1976)** **30**:1402–6, 2005
22. Deyo RA, Mirza SK, Martin BI: Error in trends, major medical complications, and charges associated with surgery for lumbar spinal stenosis in older adults. **JAMA** **306**:1088, 2011
23. Dixon AS: Bicycle sign in spinal stenosis. **Lancet (London, England)** **2**:825, 1982
24. Dohzono S, Matsumura A, Terai H, Toyoda H, Suzuki A, Nakamura H: Radiographic evaluation of postoperative bone regrowth after microscopic bilateral decompression via a unilateral approach for degenerative lumbar spondylolisthesis. **J Neurosurg Spine** **18**:472–8, 2013
25. Edwards CC, Heller JG, Murakami H: Corpectomy Versus Laminoplasty for Multilevel Cervical Myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** **27**:1168–1175, 2002
26. Epstein NE, Schwall G: Thoracic spinal stenosis: diagnostic and treatment challenges. **J Spinal Disord** **7**:259–69, 1994
27. Etemadifar M, Andalib A, Shafiee H, Samani MK: Comparison of the outcomes of cage-stand-alone with cage-with-plate fixation in one level and two levels for treating cervical

- disk diseases. **J craniovertebral junction spine** 9:170–174, 2018
28. Faraj SSA, De Kleuver M, Vila-Casademunt A, Holewijn RM, Obeid I, Acaroğlu E, et al: Sagittal radiographic parameters demonstrate weak correlations with pretreatment patient-reported health-related quality of life measures in symptomatic de novo degenerative lumbar scoliosis: a European multicenter analysis. **J Neurosurg Spine** 28:573–580, 2018
 29. Fassett DR, Schmidt MH: Spinal epidural lipomatosis: a review of its causes and recommendations for treatment. **Neurosurg Focus** 16:E11, 2004
 30. Fehlings MG, Tetreault L, Nater A, Choma T, Harrop J, Mroz T, et al: The Aging of the Global Population: The Changing Epidemiology of Disease and Spinal Disorders. **Neurosurgery** 77 Suppl 4:S1-5, 2015
 31. Fehlings MG, Barry S, Kopjar B, Yoon ST, Arnold P, Massicotte EM, et al: Anterior versus posterior surgical approaches to treat cervical spondylotic myelopathy: outcomes of the prospective multicenter AOSpine North America CSM study in 264 patients. **Spine (Phila Pa 1976)** 38:2247–52, 2013
 32. Fehlings MG, Smith JS, Kopjar B, Arnold PM, Yoon ST, Vaccaro AR, et al: Perioperative and delayed complications associated with the surgical treatment of cervical spondylotic myelopathy based on 302 patients from the AOSpine North America Cervical Spondylotic Myelopathy Study. **J Neurosurg Spine** 16:425–32, 2012
 33. Ferlic PW, Mannion AF, Jeszenszky D, Porchet F, Fekete TF, Kleinstück F, et al: Patient-reported outcome of surgical treatment for lumbar spinal epidural lipomatosis. **Spine J** 16:1333–1341, 2016
 34. Findlay C, Ayis S, Demetriades AK: Total disc replacement versus anterior cervical discectomy and fusion. **Bone Joint J** 100–B:991–1001, 2018
 35. Fogel GR, Cunningham PY, Esses SI: Spinal epidural lipomatosis: Case reports, literature review and meta-analysis. **Spine J** 5:202–211, 2005
 36. Fogel GR, Cunningham PY, Esses SI: Spinal epidural lipomatosis: Case reports, literature review and meta-analysis. **Spine J** 5:202–211, 2005
 37. Försth P, Ólafsson G, Carlsson T, Frost A, Borgström F, Fritzell P, et al: A Randomized, Controlled Trial of Fusion Surgery for Lumbar Spinal Stenosis. **N Engl J Med** 374:1413–1423, 2016

38. Fransen P: Long-term results with percutaneous interspinous process devices in the treatment of neurogenic intermittent claudication. **J spine Surg (Hong Kong)** **3**:620–623, 2017
39. Ghogawala Z, Dziura J, Butler WE, Dai F, Terrin N, Magge SN, et al: Laminectomy plus Fusion versus Laminectomy Alone for Lumbar Spondylolisthesis. **N Engl J Med** **374**:1424–1434, 2016
40. Ghogawala Z, Martin B, Benzel EC, Dziura J, Magge SN, Abbed KM, et al: Comparative effectiveness of ventral vs dorsal surgery for cervical spondylotic myelopathy. **Neurosurgery** **68**:622-30; discussion 630–1, 2011
41. Ghogawala Z, Whitmore RG: Asymptomatic cervical canal stenosis: is there a risk of spinal cord injury? **Spine J** **13**:613–4, 2013
42. Gilligan CJ., Shih JC., Cai VL., Hirsch JA., Rodrigues C., Irani ZD.: Novel single puncture approach for simplicity 3 sacral plexus radiofrequency ablation: Technical note. **Pain Physician** **19**:E643–E648, 2016
43. Glassman SD, Bridwell K, Dimar JR, Horton W, Berven S, Schwab F: The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity. **Spine (Phila Pa 1976)** **30**:2024–9, 2005
44. Goh KJ, Khalifa W, Anslow P, Cadoux-Hudson T, Donaghy M: The clinical syndrome associated with lumbar spinal stenosis. **Eur Neurol** **52**:242–9, 2004
45. Guo Q, Bi X, Ni B, Lu X, Chen J, Yang J, et al: Outcomes of three anterior decompression and fusion techniques in the treatment of three-level cervical spondylosis. **Eur Spine J** **20**:1539–44, 2011
46. Herno A, Saari T, Suomalainen O, Airaksinen O: The degree of decompressive relief and its relation to clinical outcome in patients undergoing surgery for lumbar spinal stenosis. **Spine (Phila Pa 1976)** **24**:1010–4, 1999
47. Hikata T, Watanabe K, Fujita N, Iwanami A, Hosogane N, Ishii K, et al: Impact of sagittal spinopelvic alignment on clinical outcomes after decompression surgery for lumbar spinal canal stenosis without coronal imbalance. **J Neurosurg Spine** **23**:451–8, 2015
48. Inose H, Kato T, Yuasa M, Yamada T, Maehara H, Hirai T, et al: Comparison of Decompression, Decompression Plus Fusion, and Decompression Plus Stabilization for Degenerative Spondylolisthesis: A Prospective, Randomized Study. **Clin spine Surg** **31**:E347–E352, 2018

49. Iyer S, Lenke LG, Nemani VM, Albert TJ, Sides BA, Metz LN, et al: Variations in Sagittal Alignment Parameters Based on Age: A Prospective Study of Asymptomatic Volunteers Using Full-Body Radiographs. **Spine (Phila Pa 1976)** **41**:1826–1836, 2016
50. Jensen MC, Brant-Zawadzki MN, Obuchowski N, Modic MT, Malkasian D, Ross JS: Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain. **N Engl J Med** **331**:69–73, 1994
51. Jiang S-D, Jiang L-S, Dai L-Y: Degenerative cervical spondylolisthesis: a systematic review. **Int Orthop** **35**:869–75, 2011
52. Johnsson KE: Lumbar spinal stenosis. A retrospective study of 163 cases in southern Sweden. **Acta Orthop Scand** **66**:403–5, 1995
53. Jönsson B, Annertz M, Sjöberg C, Strömqvist B: A prospective and consecutive study of surgically treated lumbar spinal stenosis. Part II: Five-year follow-up by an independent observer. **Spine (Phila Pa 1976)** **22**:2938–44, 1997
54. Jönsson B, Strömqvist B: Symptoms and signs in degeneration of the lumbar spine. A prospective, consecutive study of 300 operated patients. **J Bone Joint Surg Br** **75**:381–5, 1993
55. Kalsi-Ryan S, Singh A, Massicotte EM, Arnold PM, Brodke DS, Norvell DC, et al: Ancillary Outcome Measures for Assessment of Individuals With Cervical Spondylotic Myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** **38**:S111–S122, 2013
56. Kato S, Ganau M, Fehlings MG: Surgical decision-making in degenerative cervical myelopathy - Anterior versus posterior approach. **J Clin Neurosci** **58**:7–12, 2018
57. Kent DL, Haynor DR, Larson EB, Deyo RA: Diagnosis of lumbar spinal stenosis in adults: a metaanalysis of the accuracy of CT, MR, and myelography. **AJR Am J Roentgenol** **158**:1135–44, 1992
58. Kim H-J, Jeong J-H, Cho H-G, Chang B-S, Lee C-K, Yeom JS: Comparative observational study of surgical outcomes of lumbar foraminal stenosis using minimally invasive microsurgical extraforaminal decompression alone versus posterior lumbar interbody fusion: a prospective cohort study. **Eur Spine J** **24**:388–95, 2015
59. Kim J, Hwang JY, Oh JK, Park MS, Kim SW, Chang H, et al: The association between whole body sagittal balance and risk of falls among elderly patients seeking treatment for back pain. **Bone Jt Res** **6**:337–344, 2017

60. Koehler S, Raslan F, Stetter C, Rueckriegel SM, Ernestus R, Westermaier T: Autologous bone graft versus PEKK cage for vertebral replacement after 1- or 2-level anterior median corpectomy. **J Neurosurg Spine** **24**:309–314, 2016
61. Koller H, Schmoelz W, Zenner J, Auffarth A, Resch H, Hitzl W, et al: Construct stability of an instrumented 2-level cervical corpectomy model following fatigue testing: biomechanical comparison of circumferential antero-posterior instrumentation versus a novel anterior-only transpedicular screw–plate fixation technique. **Eur Spine J**:2015
62. Kurra S, Lavelle WF, Silverstein MP, Savage JW, Orr RD: Long-term outcomes of transforaminal lumbar interbody fusion in patients with spinal stenosis and degenerative scoliosis. **Spine J** **18**:1014–1021, 2018
63. Kushchayev S V., Glushko T, Jarraya M, Schuleri KH, Preul MC, Brooks ML, et al: ABCs of the degenerative spine. **Insights Imaging** **9**:253–274, 2018
64. Lafian AM, Torralba KD: Lumbar Spinal Stenosis in Older Adults. **Rheum Dis Clin North Am** **44**:501–512, 2018
65. Lau AC, Wang MY: Editorial. The clinical and economic costs of treating cervical radiculopathy: the age-old question of the anterior versus posterior approach. **J Neurosurg Spine** **27**:617–619, 2017
66. Lau D, Winkler EA, Than KD, Chou D, Mummaneni P V: Laminoplasty versus laminectomy with posterior spinal fusion for multilevel cervical spondylotic myelopathy: influence of cervical alignment on outcomes. **J Neurosurg Spine** **27**:508–517, 2017
67. Le Huec JC, Roussouly P: Sagittal spino-pelvic balance is a crucial analysis for normal and degenerative spine. **Eur Spine J** **20 Suppl 5**:556–7, 2011
68. Le Huec J-C, Faundez A, Dominguez D, Hoffmeyer P, Aunoble S: Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review. **Int Orthop** **39**:87–95, 2015
69. Lee BH, Yang JH, Kim HS, Suk KS, Lee HM, Park JO, et al: Effect of Sagittal Balance on Risk of Falling after Lateral Lumbar Interbody Fusion Surgery Combined with Posterior Surgery. **Yonsei Med J** **58**:1177–1185, 2017
70. Lee C-H, Chung CK, Jang J, Kim S-M, Chin D, Lee J, et al: Effectiveness of deformity-correction surgery for primary degenerative sagittal imbalance: a meta-analysis. **J Neurosurg Spine** **27**:540–551, 2017

71. Lee HM, Kim NH, Kim HJ, Chung IH: Morphometric study of the lumbar spinal canal in the Korean population. **Spine (Phila Pa 1976)** 20:1679–84, 1995
72. Legaye J, Duval-Beaupere G: Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation. **Acta Orthop Belg** 71:213–220, 2005
73. Lian X-F, Xu J-G, Zeng B-F, Zhou W, Kong W-Q, Hou T-S: Noncontiguous anterior decompression and fusion for multilevel cervical spondylotic myelopathy: a prospective randomized control clinical study. **Eur Spine J** 19:713–9, 2010
74. Liu Y, Hou Y, Yang L, Chen H, Wang X, Wu X, et al: Comparison of 3 reconstructive techniques in the surgical management of multilevel cervical spondylotic myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** 37:E1450-8, 2012
75. Liu Y, Qi M, Chen H, Yang L, Wang X, Shi G, et al: Comparative analysis of complications of different reconstructive techniques following anterior decompression for multilevel cervical spondylotic myelopathy. **Eur Spine J** 21:2428–35, 2012
76. Lovejoy CO: The natural history of human gait and posture. Part 1. Spine and pelvis. **Gait Posture** 21:95–112, 2005
77. Lurie JD, Tosteson TD, Tosteson A, Abdu WA, Zhao W, Morgan TS, et al: Long-term outcomes of lumbar spinal stenosis: eight-year results of the Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT). **Spine (Phila Pa 1976)** 40:63–76, 2015
78. Ma X-L, Zhao X-W, Ma J-X, Li F, Wang Y, Lu B: Effectiveness of surgery versus conservative treatment for lumbar spinal stenosis: A system review and meta-analysis of randomized controlled trials. **Int J Surg** 44:329–338, 2017
79. Madkouri R, Brauge D, Vidon-Buthion A, Fahed E, Mourier K, Beaurain J, et al: Improvement in Sagittal Balance After Decompression Surgery without Fusion in Patients with Degenerative Lumbar Stenosis: Clinical and Radiographic Results at 1 Year. **World Neurosurg** 114:e417–e424, 2018
80. Makhni MC, Shillingford JN, Laratta JL, Hyun S-J, Kim YJ: Restoration of Sagittal Balance in Spinal Deformity Surgery. **J Korean Neurosurg Soc** 61:167–179, 2018
81. Malone JB, Bevan PJ, Lewis TJ, Nelson AD, Edward D, Eastland M: Incidence of spinal epidural lipomatosis in patients with spinal stenosis. **J Orthop** 15:36–39, 2018
82. Mardare M, Oprea M, Popa I, Zazgyva A, Niculescu M, Poenaru D V: Sagittal balance parameters correlate with spinal conformational type and MRI changes in lumbar

- degenerative disc disease: results of a retrospective study. **Eur J Orthop Surg Traumatol** **26**:735–43, 2016
83. Matsumoto T, Tamaki T, Kawakami M, Yoshida M, Ando M, Yamada H: Early complications of high-dose methylprednisolone sodium succinate treatment in the follow-up of acute cervical spinal cord injury. **Spine (Phila Pa 1976)** **26**:426–30, 2001
 84. Mattei T a, Goulart CR, Milano JB, Dutra LPF, Fasset DR: Cervical spondylotic myelopathy: pathophysiology, diagnosis, and surgical techniques. **ISRN Neurol** **2011**:463729, 2011
 85. Mehta VA, Amin A, Omeis I, Gokaslan ZL, Gottfried ON: Implications of spinopelvic alignment for the spine surgeon. **Neurosurgery** **76 Suppl 1**:S42–56; discussion S56, 2015
 86. Miyamoto H, Sumi M, Uno K, Tadokoro K, Mizuno K: Clinical outcome of nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis, and predictive factors relating to prognosis, in a 5-year minimum follow-up. **J Spinal Disord Tech** **21**:563–568, 2008
 87. Morvan G, Mathieu P, Vuillemin V, Guerini H, Bossard P, Zeitoun F, et al: Standardized way for imaging of the sagittal spinal balance. **Eur Spine J** **20 Suppl 5**:602–8, 2011
 88. Nanda A, Sharma M, Sonig A, Ambekar S, Bollam P: Surgical complications of anterior cervical discectomy and fusion for cervical degenerative disk disease: a single surgeon's experience of 1,576 patients. **World Neurosurg** **82**:1380–7, 2014
 89. Niedzielak TR, Palmer J, Malloy JP: Clinical Comparison of Surgical Constructs for Anterior Cervical Corpectomy and Fusion in Patients With Cervical Spondylotic Myelopathy or Ossified Posterior Longitudinal Ligament: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Clin spine Surg** **31**:247–260, 2018
 90. Nouri A, Tetreault L, Singh A, Karadimas SK, Fehlings MG: Degenerative Cervical Myelopathy: Epidemiology, Genetics, and Pathogenesis. **Spine (Phila Pa 1976)** **40**:E675-93, 2015
 91. Nouri A, Tetreault L, Singh A, Karadimas SK, Fehlings MG: Degenerative Cervical Myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** **40**:E675–E693, 2015
 92. Nygaard OP, Kloster R, Solberg T: Duration of leg pain as a predictor of outcome after surgery for lumbar disc herniation: a prospective cohort study with 1-year follow up. **J Neurosurg** **92**:131–4, 2000

93. Oliver JD, Goncalves S, Kerezoudis P, Alvi MA, Freedman BA, Nassr A, et al: Comparison of Outcomes for Anterior Cervical Discectomy and Fusion With and Without Anterior Plate Fixation: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Spine (Phila Pa 1976)** **43**:E413–E422, 2018
94. Oshina M, Oshima Y, Tanaka S, Riew KD: Radiological Fusion Criteria of Postoperative Anterior Cervical Discectomy and Fusion: A Systematic Review. **Glob Spine J** **8**:739–750, 2018
95. Overley SC, Merrill RK, Leven DM, Meaike JJ, Kumar A, Qureshi SA: A Matched Cohort Analysis Comparing Stand-Alone Cages and Anterior Cervical Plates Used for Anterior Cervical Discectomy and Fusion. **Glob spine J** **7**:394–399, 2017
96. Park HK, Chang JC: Microdecompression in spinal stenosis: a review. **J Neurosurg Sci** **58**:57–64, 2014
97. Pathria M: Imaging of spine instability. **Semin Musculoskelet Radiol** **9**:88–99, 2005
98. Patil PG, Turner DA, Pietrobon R: National trends in surgical procedures for degenerative cervical spine disease: 1990-2000. **Neurosurgery** **57**:753-8; discussion 753-8, 2005
99. Patil PG, Turner DA, Pietrobon R: National trends in surgical procedures for degenerative cervical spine disease: 1990-2000. **Neurosurgery** **57**:753-8; discussion 753-8, 2005
100. Pearson A, Lurie J, Tosteson T, Zhao W, Abdu W, Weinstein JN: Who should have surgery for spinal stenosis? Treatment effect predictors in SPORT. **Spine (Phila Pa 1976)** **37**:1791–802, 2012
101. Peck GE, Shipway DJH, Tsang K, Fertleman M: Cervical spine immobilisation in the elderly: a literature review. **Br J Neurosurg** **32**:286–290, 2018
102. Perrini P, Gambacciani C, Martini C, Montemurro N, Lepori P: Anterior cervical corpectomy for cervical spondylotic myelopathy: Reconstruction with expandable cylindrical cage versus iliac crest autograft. A retrospective study. **Clin Neurol Neurosurg** **139**:258–63, 2015
103. Radcliff KE, Rihn J, Hilibrand A, Dilorio T, Tosteson T, Lurie JD, et al: Does the duration of symptoms in patients with spinal stenosis and degenerative spondylolisthesis affect outcomes?: analysis of the Spine Outcomes Research Trial. **Spine (Phila Pa 1976)** **36**:2197–210, 2011

104. Radovanovic I, Urquhart JC, Ganapathy V, Siddiqi F, Gurr KR, Bailey SI, et al: Influence of postoperative sagittal balance and spinopelvic parameters on the outcome of patients surgically treated for degenerative lumbar spondylolisthesis. **J Neurosurg Spine** **26**:448–453, 2017
105. Raspe H: Rückenschmerzen. **Gesundheitsberichterstattung des Bundes Heft 53**:1–31, 2012
106. Rhee JM, Shamji MF, Erwin WM, Bransford RJ, Yoon ST, Smith JS, et al: Nonoperative management of cervical myelopathy: a systematic review. **Spine (Phila Pa 1976)** **38**:S55-67, 2013
107. Rhee J, Tetreault LA, Chapman JR, Wilson JR, Smith JS, Martin AR, et al: Nonoperative Versus Operative Management for the Treatment Degenerative Cervical Myelopathy: An Updated Systematic Review. **Glob spine J** **7**:35S–41S, 2017
108. Rhee J, Tetreault LA, Chapman JR, Wilson JR, Smith JS, Martin AR, et al: Nonoperative Versus Operative Management for the Treatment Degenerative Cervical Myelopathy: An Updated Systematic Review. **Glob Spine J** **7**:35S–41S, 2017
109. Richmond BJ, Ghodadra T: Imaging of spinal stenosis. **Phys Med Rehabil Clin N Am** **14**:41–56, 2003
110. Rodriguez-Martinez NG, Perez-Orribo L, Kalb S, Reyes PM, Newcomb AGUS, Hughes J, et al: The role of obesity in the biomechanics and radiological changes of the spine: an in vitro study. **J Neurosurg Spine** **24**:615–23, 2016
111. Ross MN, Ross DA: Minimally Invasive Cervical Laminectomy for Cervical Spondylotic Myelopathy. **Clin Spine Surg** **31**:331–338, 2018
112. Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J: Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. **Spine (Phila Pa 1976)** **30**:346–53, 2005
113. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL: Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. **Eur Spine J** **20 Suppl 5**:609–18, 2011
114. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL: Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. **Eur Spine J** **20 Suppl 5**:1–10, 2011
115. Ruetten S, Komp M, Merk H, Godolias G: Full-endoscopic cervical posterior foraminotomy for the operation of lateral disc herniations using 5.9-mm endoscopes: A

- prospective, randomized, controlled study. **Spine (Phila Pa 1976)** **33**:940–948, 2008
116. Sasaki K: Magnetic resonance imaging findings of the lumbar root pathway in patients over 50 years old. **Eur Spine J** **4**:71–6, 1995
117. Sasso RC, Ruggiero R a, Reilly TM, Hall P V: Early reconstruction failures after multilevel cervical corpectomy. **Spine (Phila Pa 1976)** **28**:140–2, 2003
118. Schmidt CO, Raspe H, Pflingsten M, Hasenbring M, Basler HD, Eich W, et al: Back pain in the German adult population: prevalence, severity, and sociodemographic correlates in a multiregional survey. **Spine (Phila Pa 1976)** **32**:2005–11, 2007
119. Schwab F, Patel A, Ungar B, Farcy J, Lafage V: Adult Spinal Deformity — Postoperative Standing Imbalance how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. **Spine (Phila Pa 1976)** **35**:2224–2231, 2010
120. Seo HS, Eom YH, Kim MK, Kim Y-M, Song BJ, Song KY: A one-day surgical-skill training course for medical students' improved surgical skills and increased interest in surgery as a career. **BMC Med Educ** **17**:265, 2017
121. Shamji MF, Cook C, Pietrobon R, Tackett S, Brown C, Isaacs RE: Impact of surgical approach on complications and resource utilization of cervical spine fusion: a nationwide perspective to the surgical treatment of diffuse cervical spondylosis. **Spine J** **9**:31–38, 2009
122. Shamji MF, Cook C, Tackett S, Brown C, Isaacs RE: Impact of preoperative neurological status on perioperative morbidity associated with anterior and posterior cervical fusion. **J Neurosurg Spine** **9**:10–6, 2008
123. Shamji MF, Massicotte EM, Traynelis VC, Norvell DC, Hermsmeyer JT, Fehlings MG: Comparison of anterior surgical options for the treatment of multilevel cervical spondylotic myelopathy. **Spine (Phila Pa 1976)** **38**:S195–S206, 2013
124. Sheng B, Feng C, Zhang D, Spitler H, Shi L: Associations between Obesity and Spinal Diseases: A Medical Expenditure Panel Study Analysis. **Int J Environ Res Public Health** **14**:1–11, 2017
125. Shin M, Ryu K, Hur J, Kim J, Park C: Comparative study of lumbopelvic sagittal alignment between patients with and without sacroiliac joint pain after lumbar interbody fusion. **Spine (Phila Pa 1976)** **38**:E1334-41, 2013

126. Simotas AC, Dorey FJ, Hansraj KK, Cammisa F: Nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis: Clinical and outcome results and a 3-year survivorship analysis. **Spine (Phila Pa 1976)** **25**:197–204, 2000
127. Song K, Choi B: Current concepts of anterior cervical discectomy and fusion: a review of literature. **Asian Spine J** **8**:531–9, 2014
128. Stienen MN, Joswig H, Smoll NR, Corniola M V, Schaller K, Hildebrandt G, et al: Influence of Body Mass Index on Subjective and Objective Measures of Pain, Functional Impairment, and Health-Related Quality of Life in Lumbar Degenerative Disc Disease. **World Neurosurg** **96**:570–577.e1, 2016
129. Strube P, Hoff EK, Perka CF, Gross C, Putzier M: Influence of the Type of Sagittal Profile on Clinical Results of Lumbar Total Disk Replacement After a Mean Follow-Up of 39 Months. **Clin Spine Surg** **29**:291–299, 2016
130. Strube P, Hoff EK, Perka CF, Gross C, Putzier M: Influence of the Type of the Sagittal Profile on Clinical Results of Lumbar Total Disc Replacement After a Mean Follow-up of 39 Months. **J Spinal Disord Tech** **49**:1–24, 2013
131. Strube P, Pumberger M, Sonnow L, Zippelius T, Nowack D, Zahn RK, et al: Association Between Lumbar Spinal Degeneration and Anatomic Pelvic Parameters. **Clin spine Surg** **31**:263–267, 2018
132. Study AP: Anterior Cervical Discectomy and Fusion. **43**:207–214, 2018
133. Sun J, Wang J, Zhang L, Huang H, Fu N: Sagittal Alignment as Predictor of Adjacent Segment Disease After Lumbar Transforaminal Interbody Fusion. **World Neurosurg** **110**:e567–e571, 2018
134. Tasiou A, Giannis T, Brotis AG, Siasios I, Georgiadis I, Gatos H, et al: Anterior cervical spine surgery-associated complications in a retrospective case-control study. **J spine Surg (Hong Kong)** **3**:444–459, 2017
135. Tatarek NE: Variation in the human cervical neural canal. **Spine J** **5**:623–31, 2005
136. Teresi LM, Lufkin RB, Reicher MA, Moffit BJ, Vinuela F V, Wilson GM, et al: Asymptomatic degenerative disk disease and spondylosis of the cervical spine: MR imaging. **Radiology** **164**:83–8, 1987
137. Thippeswamy PB, Kumaran SP, Hegde V, Viswamitra S: Complications exclusive to long strut grafts used following multilevel cervical corpectomy: Utilization of advanced

imaging techniques. **Indian J Radiol Imaging** 27:263–267, 2017

138. Thomé C, Zevgaridis D, Leheta O, Bätzner H, Pöckler-Schöniger C, Wöhrle J, et al: Outcome after less-invasive decompression of lumbar spinal stenosis: a randomized comparison of unilateral laminotomy, bilateral laminotomy, and laminectomy. **J Neurosurg Spine** 3:129–41, 2005
139. Tracy J a, Bartleson JD: Cervical spondylotic myelopathy. **Neurologist** 16:176–87, 2010
140. Vaccaro AR, Falatyn SP, Scuderi GJ, Eismont FJ, McGuire RA, Singh K, et al: Early failure of long segment anterior cervical plate fixation. **J Spinal Disord** 11:410–5, 1998
141. VERBIEST H: A radicular syndrome from developmental narrowing of the lumbar vertebral canal. **J Bone Joint Surg Br** 36–B:230–7, 1954
142. Vialle R, Levassor N, Rillardon L, Templier A, Skalli W, Guigui P: Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. **J Bone Joint Surg Am** 87:260–7, 2005
143. Wang JC, Hart RA, Emery SE, Bohlman HH: Graft migration or displacement after multilevel cervical corpectomy and strut grafting. **Spine (Phila Pa 1976)** 28:1016-21; discussion 1021–2, 2003
144. Wei-bing X, Wun-Jer S, Gang L, Yue Z, Ming-xi J, Lian-shun J: Reconstructive techniques study after anterior decompression of multilevel cervical spondylotic myelopathy. **J Spinal Disord Tech** 22:511–5, 2009
145. Weinstein JN, Lurie JD, Tosteson TD, Hanscom B, Tosteson AN a, Blood E a, et al: Surgical versus nonsurgical treatment for lumbar degenerative spondylolisthesis. **N Engl J Med** 356:2257–2270, 2007
146. Weinstein JN, Tosteson TD, Lurie JD, Tosteson A, Blood E, Herkowitz H, et al: Surgical versus nonoperative treatment for lumbar spinal stenosis four-year results of the Spine Patient Outcomes Research Trial. **Spine (Phila Pa 1976)** 35:1329–1338, 2010
147. Weinstein JN, Tosteson TD, Lurie JD, Tosteson AN a, Blood E, Hanscom B, et al: Surgical versus nonsurgical therapy for lumbar spinal stenosis. **N Engl J Med** 358:794–810, 2008
148. Wildermuth S, Zanetti M, Duewell S, Schmid MR, Romanowski B, Benini A, et al: Lumbar spine: quantitative and qualitative assessment of positional (upright flexion and

- extension) MR imaging and myelography. **Radiology** **207**:391–398, 1998
149. Wybier M, Bossard P: Musculoskeletal imaging in progress: the EOS imaging system. **Joint Bone Spine** **80**:238–43, 2013
150. Youn MS, Shin JK, Goh TS, Son SM, Lee JS: Endoscopic posterior decompression under local anesthesia for degenerative lumbar spinal stenosis. **J Neurosurg Spine**:1–6, 2018
151. Youssef JA, Orndorff DO, Patty CA, Scott MA, Price HL, Hamlin LF, et al: Current status of adult spinal deformity. **Glob spine J** **3**:51–62, 2013
152. Yu J, Ha Y, Shin JJ, Oh JK, Lee CK, Kim N, et al: Influence of plate fixation on cervical height and alignment after one- or two-level anterior cervical discectomy and fusion. **Br J Neurosurg** **32**:188–195, 2018
153. Zhu B, Xu Y, Liu X, Liu Z, Dang G: Anterior approach versus posterior approach for the treatment of multilevel cervical spondylotic myelopathy: A systemic review and meta-analysis. **Eur Spine J** **22**:1583–1593, 2013

7. Danksagung

Im Besonderen möchte ich meinem Chef und Doktorvater Professor Dr. Peter Vajkoczy danken. Er hat mir die Möglichkeit einer hervorragenden klinischen und wissenschaftlichen Ausbildung geboten, welche Grundlage für diese Arbeit war. Er hat mich in meiner wissenschaftlichen Arbeit immer unterstützt und selbst viele Projekte dieser Arbeit initiiert.

Ich möchte außerdem Herrn PD Dr. Johannes Woitzik und Herrn PD Dr. Marcus Czabanka danken. Beide haben mir wissenschaftlich, vor Allem aber operativ sehr viel beigebracht.

Herzlichst danke ich Herrn Dr. Vincent Prinz und Herrn Dr. Tobias Finger, welche mir als klinische und wissenschaftliche Wegbegleiter sowie als Freunde immer zur Seite standen.

Herr Dr. Florian Pöhlmann und auch Malte Dinkelbach haben als Doktoranden einen großen Beitrag zu einigen wissenschaftlichen Arbeiten geleistet – vielen Dank.

Natürlich gebührt mein Dank auch meinen Eltern Rolf Heinz Bayerl und Agnes Maria Süttmann sowie meinem Stiefvater Ulrich Prochaska für ihre Unterstützung und ihre Vorbildfunktion als Menschen und Ärzte.

Allen voran danke ich meiner geliebten Ehefrau und Partnerin Frau Dr. Nazli Esfahani-Bayerl für ihre wissenschaftliche Unterstützung, die Arbeit an gemeinsamen Projekten, ihre Hingabe, ihre bedingungslose Loyalität und das unbeschreibliche Geschenk mit der Geburt unseres Sohnes Pouria Raphael Bayerl. Ohne Sie wäre eine solche Leistung nicht möglich gewesen.

8. Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

Datum

Unterschrift