

Aus der Klinik für Neurochirurgie des  
BG Klinikum Bergmannstrost Halle (Saale)

DISSERTATION

Perkutane endoskopische Sequestrektomie beim foraminalen  
Bandscheibenprolaps - Risiken für einen Rezidivprolaps und  
Grenzen der Operationsmethode bei Instabilität

Percutaneous endoscopic sequestrectomy of the foraminal disc  
herniation – risk factors for recurrence and limits of the procedure in  
reference to preexisting instability

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Lydia Mahler

aus Wolfen

Datum der Promotion: 4. März 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Epidemiologie der degenerative Bandscheibenerkrankungen	1
1.2	Ätiologie der degenerativen Bandscheibenerkrankungen und Degeneration des Bewegungssegmentes	1
1.3	Der lumbale Bandscheibenprolaps	3
1.4	Der intra- bzw. extraforaminale Bandscheibenprolaps	4
1.5	Instabilität im Rahmen der Degeneration	7
1.6	Bildgebende Kriterien der Degeneration und Instabilität	9
1.7	Geschichte der endoskopische Bandscheibenoperationen	11
1.8	Die perkutane endoskopische Sequestrektomie von posterolateral in der Foraminal-retreat-Technik	14
1.9	Zielstellung	19
1.10	Hypothesen	19
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	21
2.1	Patient*innenkollektiv	21
2.2	Erhebung der Stammdaten	24
2.3	Erhebung der Degenerations-/Instabilitätsparameter anhand der präoperativen MRT der LWS	25
2.4	Statistische Auswertung	30
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	33
3.1	Einschluss in die Studie	33
3.2	Allgemeiner Gruppenvergleich	34
3.3	Univariate Analyse der Degenerations- und Instabilitätsparameter	36
3.4	Logistische Regression der signifikanten Parameter	40
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b>	45
4.1	Allgemein	45
4.2	Rezidivrate	45
4.3	Bewertung der Ergebnisse und Einordnung in die Literatur	47

4.4	Kritik	51
4.5	Zusammenfassung	52
4.6	Ausblick	53
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>54</b>
	<b>Eidesstattliche Versicherung</b>	<b>61</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>63</b>
	<b>Publikationsliste</b>	<b>65</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>66</b>
	<b>Widmung</b>	<b>67</b>

## Abstract

Die mikrochirurgische Sequestrektomie via interlaminärer Fensterung ist der aktuelle Goldstandard in der operativen Behandlung von lumbalen Bandscheibenvorfällen. Ein Sonderfall sind die intra- und extraforaminalen Bandscheibenvorfälle, die aufgrund der weit lateralen Lage über diesen Standardzugang meist nicht ohne teilweise oder vollständige Resektion des Facettengelenkes möglich sind. Eine (teilweise) Arthrektomie führt schließlich zu einer Instabilität, die eine zusätzliche Versteifung des Bewegungssegmentes erforderlich machen kann. Mit der Einführung der Endoskopie in die spinale Neurochirurgie steht hierfür nun alternativ die perkutane endoskopische lumbale Sequestrektomie von posterolateral als gewebeschonende und dennoch sichere Operationsmethode zur Verfügung. Es zeigt sich hierbei jedoch eine Rezidivrate von bis zu 15%, welche eine erneute Operation notwendig machen kann. Für den klinischen Alltag ist es essentiell zu wissen, welche Patient\*innen ein solches erleiden, um dahingehend eine individuelle Aufklärung und Beratung anbieten zu können. In dieser Arbeit wurde insbesondere die präoperativ vorhandene MRT-Bildgebung auf Risikofaktoren für das Auftreten eines operationspflichtigen Rezidives untersucht. Hierbei erwiesen sich drei Variablen als geeignet: die Bandscheibendegeneration nach Pfirrmann, Modic-Veränderungen der Wirbelkörperabschlussplatten sowie der Einfluss einer Knickfehlstellung des Bewegungssegmentes in der Coronarebene in Richtung der Pathologie, eigens definiert über einen adaptierten, hier erstmals eingeführten monosegmentalen Cobb-Winkel. Als Ursache für das Rezidivieren eines foraminalen Bandscheibenprolaps ist eine vorbestellende Mikroinstabilität zu diskutieren. Erstrebenswert wäre die Entwicklung eines Score, um anhand dessen eine präoperative, individuelle Risikoabschätzung gewährleisten zu können.

The present gold standard in surgical therapy of lumbar disc prolapse is the microscopic sequestrectomy via interlaminar approach. However it is not suitable for far lateral foraminal disc herniations, therefore we usually need an additional partial or complete arthectomy of the facet joint. This leads to potential instability and in some cases necessity for spinal fusion. As an alternative to open microscopic surgery we can provide the percutaneous endoscopic approach as a safe and tissue conserving method. Though we had to note a relatively high recurrence rate up to 15% leading to repeated surgery. This scientific work examines risk factors for recurrent disc prolapse liable to repeated surgery in various aspects of the preoperative MRI-Scans. Regarding this we found three variables to be related to recurrent disc prolapse: the degeneration of the disc itself categorized as Pfirrmann grades, the degeneration of the vertebral endplate categorized as Modic changes and segmental kinking in coronar plain, represented as an adapted monosegmental Cobb angle, specifically introduced here. A major reason for recurrence of far lateral lumbar disc prolapse might be preexisting microinstability. As future purpose it would be desirable to develop a scoring system to assess the individual risk of a patient before surgery.

# 1 Einleitung

## 1.1 Epidemiologie der degenerative Bandscheibenerkrankungen

Kreuzschmerz zählt zu den 5 häufigsten Konsultationsgründen beim Allgemeinmediziner. [1] Hierbei spielt der unspezifische Rückenschmerz die größte Rolle. In bis zu 20% der Fälle liegt der Diagnose allerdings eine strukturelle Läsion zugrunde, wobei hier der lumbale Bandscheibenprolaps die mit Abstand häufigste spezifische Diagnose darstellt. [2] Mit einer Jahresprävalenz von 1-2,5% kann man durchaus von einer Volkskrankheit sprechen. [3] Hieraus resultieren natürlich auch relevante volkswirtschaftliche Kosten. In den Jahren 2000-2007 waren ca. 2% aller Arbeitsunfähigkeitsbescheinigungen der bei der BARMER GEK Versicherten auf die Diagnose des lumbalen Bandscheibenprolaps zurückzuführen. Etwa 6% von diesen benötigten einen vollstationären Krankenhausaufenthalt. Wiederum mehr als 50% dieser Patient\*innen unterzog sich hierbei schlussendlich einer Operation. Patient\*innen, die älter als 50 Jahre sind und an einem lumbalen Bandscheibenprolaps litten, hatten insgesamt ein um 205% erhöhtes Risiko für eine Frühinvalidität, bei über 60 Jährigen stieg zudem das Risiko einer Pflegebedürftigkeit um 198%. [2]

## 1.2 Ätiologie der degenerativen Bandscheibenerkrankungen und Degeneration des Bewegungssegmentes

Der Degenerationsprozess der Bandscheibe setzt bereits im frühen Kindesalter ein. [3] Multiple Faktoren spielen hierbei eine Rolle.

Makroanatomisch besteht die Bandscheibe aus verschiedenen Teilen: Zum einen aus dem Nucleus pulposus, dem inneren Kern. Zum anderen aus dem Anulus fibrosus, welcher diesen umgibt und aus sich kreuzenden Fasersträngen besteht. Daran grenzen die Wirbelkörperabschlussplatten, also die Grundplatte des kranialen und die Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers mit einer hyalinen Knorpelschicht zwischen Wirbelkörper und

Bandscheibe. Auf zellulärer Ebene besteht der Nucleus pulposus aus knorpelähnlichen Zellen (chondrocyte like cells), die eine Matrix aus vor allem Typ II Kollagen, Proteoglykanen und verschiedenen Proteinen sowie Elastinfasern produzieren. Diese Matrix ist in der Lage, große Mengen Wasser zu binden und sorgt damit für die Elastizität der Bandscheibe. Der Anulus fibrosus besteht hauptsächlich aus Kollagen Typ I Fasern und ist als äußere Hülle verantwortlich für die Zugfestigkeit. [4]

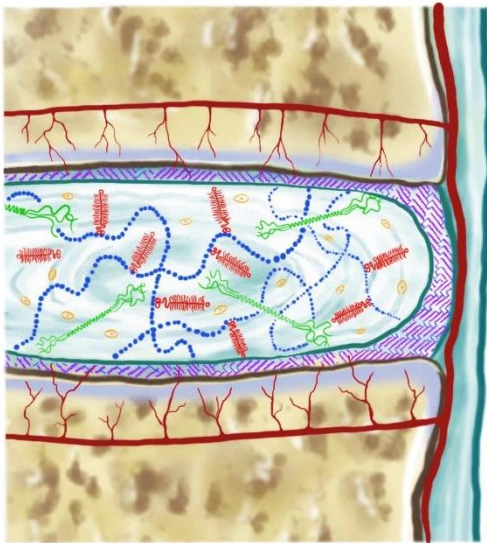


Abbildung 1: Aufbau der Bandscheibe und des lumbalen Bewegungssegmentes

Die erwachsene Bandscheibe verfügt über keine eigene, direkte Blutversorgung. [3] Als Ursache der Degeneration werden verschiedene Faktoren diskutiert: eine nutritive Minderversorgung, Alterungsprozesse auf zellulärer Ebene und ein Ungleichgewicht zwischen Synthetisieren neuer und Abbau alter Matrixbestandteile. Auch die stetige mechanische Belastung spielt hierbei sicherlich eine Rolle. [5] Beginnende Sklerosierungen der Gefäße und eine zunehmende Kalzifizierung der knorpeligen Abschlussplatten führen zu einer verminderten Permeabilität und Nutrition. Es kommt zu pH-Veränderungen und damit zu qualitativen und quantitativen Veränderungen der Matrixbestandteile. [5] Der Proteoglykan- und Wassergehalt sinkt und damit auch die Elastizität des Nucleus pulposus. [4] Kollagen und Abbauprodukte aggregieren und akkumulieren, gleichzeitig verändert sich der Kollagengehalt zu Gunsten des deutlich

weniger elastischen Kollagen Typ I. [5] In der Matrix bilden sich Kalzifikationszonen und Zellcluster. Die lamelläre Struktur geht verloren, es kommt zur Delamination. Die Grenze zwischen Anulus und Nucleus verschwimmt zusehends. [6]

Durch mechanische Belastung sowie die eben beschriebenen Umstrukturierungen kommt es zum einen zum Flüssigkeits- und damit Höhenverlust des Nucleus pulposus, zum anderen zu Rissbildungen im Anulus fibrosus. Vor allem aufgrund des Fehlens der direkten Blutversorgung ist die Regenerationskapazität deutlich eingeschränkt. In der Folge der Degeneration der Bandscheibe selbst kommt es zu einer verminderten ligamentären Spannung und einer verstärkten mechanischen Belastung auf die Facettengelenke, welche mit Hypertrophie und Spondylarthrose reagieren. [3] Die Knorpelschicht wird dünner, unregelmäßiger und verschwindet schließlich vollständig, wohingegen die darunterliegende Kalzifikationszone des Knochens zunimmt und die Knochenstruktur verdichtet. [7] Muskuläre Insuffizienzen und die Dekompensation der nervalen Kontrolle resultieren und führen ihrerseits zu einer zunehmenden Belastung des Bewegungssegmentes. [8]

### **1.3 Der lumbale Bandscheibenprolaps**

Über die Fissuren im Anulus fibrosus kann unter axialer Last bzw. insbesondere unter Torsionskräften bei der Bewegung ein Teil des degenerierten Nucleus pulposus über den Anulus prolabieren, es kommt zu einem Bandscheibenvorfall. Der symptomatische lumbale Bandscheibenprolaps führt zu einer Kompression der nervalen Strukturen im Spinalkanal und damit zu radikulär ausstrahlendem Beinschmerz. Auch die sensiblen oder motorischen Fasern der Spinalnerven können betroffen sein, so dass es zu Sensibilitätsstörungen im entsprechenden Dermatom und Paresen der Kennmuskeln kommen kann. Bei einem massiven Bandscheibenprolaps können auch die Fasern der Cauda equina oder der Conus medullaris selbst komprimiert werden und zu einem Funktionsausfall des Blasen-/ Mastdarm-Systems führen.



Tritt ein lumbaler Bandscheibenprolaps auf, gibt es prinzipiell zwei Therapieoptionen: konservativ und operativ. Durch Austrocknen des Prolaps, sobald dieser nicht mehr über die Bandscheibe selbst mit Flüssigkeit versorgt wird, kann dieser einschrumpfen und im Idealfall mit fortschreitender Dauer den kompressiven Effekt auf den Spinalnerven verlieren. Der Spinalnerv kann sich regenerieren. Dies ist das Ziel der konservativen Therapie. Konservative Therapieoptionen beinhalten die Analgesie nach WHO Stufenschema, Physiotherapie mit eingangs Dehnübungen und isometrischen Spannungsübungen, später Krankengymnastik und Muskelaufbau sowie schmerztherapeutische Infiltrationen mit Lokalanästhetikum und Cortisonpräparaten insbesondere an den betroffenen Nervenwurzelabgang. Indikationen für die frühzeitige operative Therapie sind üblicherweise das Auftreten funktionell beeinträchtigender motorische Defizite, eine Sensibilitätsstörung im Anogenitalbereich („Reithosenhypästhesie“) oder einer Funktionsstörung der Sphincteren. Auch bei Versagen der konservativen Therapie ist die Operation die Therapiemethode der Wahl. Hierbei gibt es verschiedene Techniken, üblich ist die mikrochirurgische Dekompression als interlaminäre Fensterung und Sequestrektomie unter Mikroskopsicht.

#### **1.4 Der intra- bzw. extraforaminale Bandscheibenprolaps**

Ein Sonderfall des lumbalen Bandscheibenprolaps ist der intra- oder extraforaminale Bandscheibenprolaps. Etwa 7-12% aller lumbalen Bandscheibenherniationen befinden sich intra- oder extraforaminal. [9], [10] Die Diagnostik dieser Entität hat mit der Entwicklung der MRT einen erheblichen Fortschritt gemacht, da diese Art Vorfall in der bis dahin üblichen CT oder Myelografie nicht oder nur sehr begrenzt darstellbar war. [9] Anatomisch betrachtet liegt der intraforaminale Prolaps im Neuroforamen zwischen der medialen und lateralen Pedikelbegrenzung, der extraforaminale lateral des Pedikels. Im Gegensatz zum typischen medialen oder mediolateralen Bandscheibenprolaps, der sich innerhalb der Grenzen des Spinalkanals befindet und die untere Nervenwurzel am Abgang aus dem Duralsack komprimiert, kommt es hier zu einer Affektion der oberen Nervenwurzel im Neuroforamen. Zum einen ist hier der Reserveraum begrenzt, zum anderen befindet sich am Ausgang des Neuroforamen das besonders vulnerable

Spinalganglion. Eine intra- oder extraforaminale Kompression des Spinalnerven durch diese Art des lumbalen Bandscheibenprolapses führt typischerweise zu einem akut auftretenden Radikulärsyndrom mit ungewöhnlich starker Schmerzintensität und frühem Eintreten sensomotorischer Defizite. Hieraus resultiert auch die häufige Indikation zur operativen Therapie. Es wird geschätzt, dass lediglich 10% dieser Patient\*innen adäquat konservativ behandelt werden können. [10]

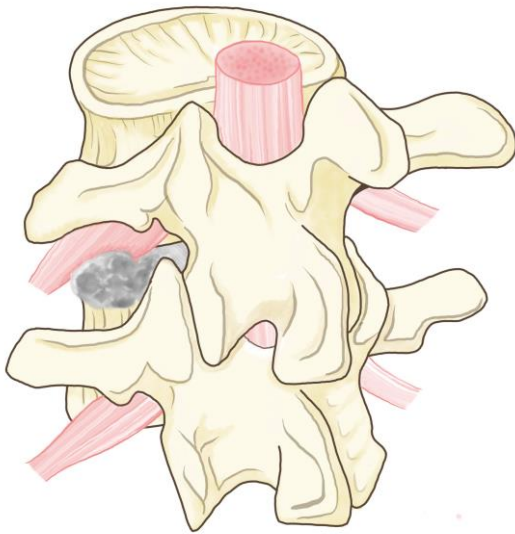


Abbildung 2: foraminaler Bandscheibenprolaps

Bevor die Endoskopie in die spinale Neurochirurgie Einzug fand, wurden verschiedenste offene Dekompressionsverfahren angewandt, die hier kurz vorgestellt werden sollen. Da die adressierte Pathologie beim offenen dorsalen Zugang insbesondere vom Facettengelenk verdeckt ist, ist in aller Regel die teilweise oder vollständige Resektion des Gelenkes notwendig gewesen. Beginnend mit einer Laminotomie oder Hemilaminektomie zur Dekompression des ipsilateralen Spinalkanals konnte eine mediale Facettektomie angeschlossen werden. Hierüber konnten vor allem Läsionen am Eingang in das Neuroforamen erreicht werden. Bei weiter distalen Pathologien war zusätzlich die extraforaminale Exploration im Sinne der intertransversen Technik notwendig, bei der vor

allein die Pars interarticularis des Facettengelenkes erhalten wird. Kann auch über diese Dekompressionsmethode keine ausreichende Darstellung der Pathologie erreicht werden, musste eine komplette Facettektomie erfolgen. [10]

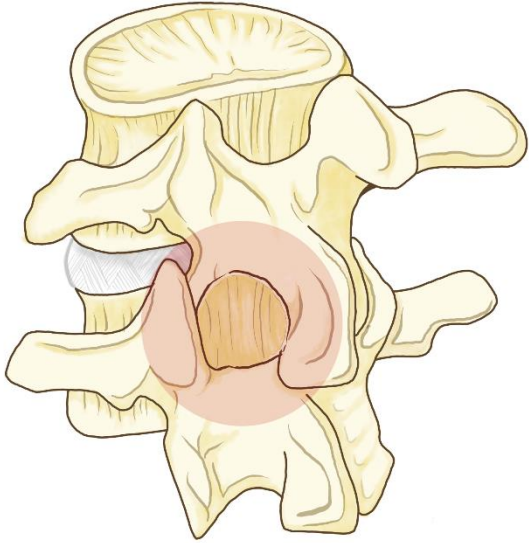


Abbildung 3: mediale Facettektomie

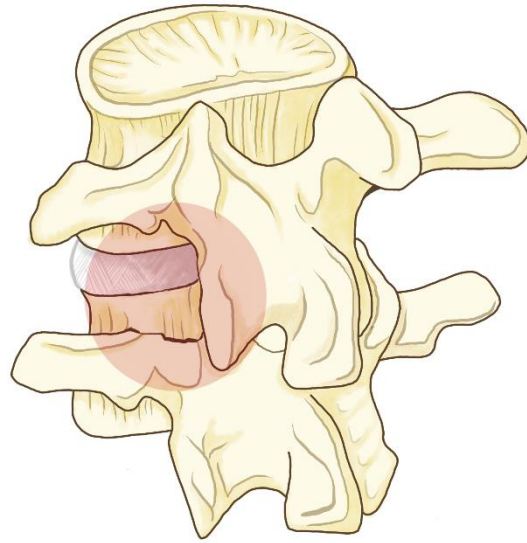


Abbildung 4: intertransverser Zugang

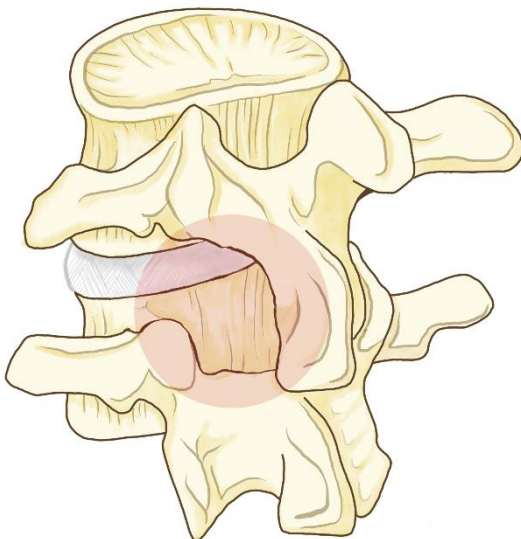


Abbildung 5: komplette Facettektomie

Je größer das Ausmaß der Gelenkresektion, desto größer ist das Risiko einer Instabilität. [11]. Da in den unteren lumbalen Bewegungssegmenten das Facettengelenk mehr Fläche bedeckt, ist hier häufiger eine ausgedehntere Facettektomie erforderlich. [10] Gleichzeitig treten intra- oder extraforaminale Bandscheibenherniationen bevorzugt in den Segmenten LWK3/4 oder LWK4/5 auf, gefolgt von LWK5/SWK1. [11] Eine weitere Operationsmethode ist der laterale transmuskuläre Zugang nach Wiltse. [12] Hierbei wird von lateral zwischen dem M. multifidus und dem M. longissimus bis zum Facettengelenk präpariert. Nach Abtragen des Ligamentum intertransversarium kann der extraforaminale Raum inspiziert werden. Gegebenenfalls muss allerdings auch hier von lateral ein Teil des Facettengelenkes reseziert werden, um eine ausreichende Übersicht zu erreichen. [13]

Die Tatsache, dass vor allem für jüngere Patient\*innen (<65 Jahre) die Indikation zur primären Fusion diskutiert wird [11], ist auf den ersten Blick paradox. Legt man allerdings die Theorie zugrunde, nach der insbesondere zu Beginn der degenerativen Kaskade eine Mikroinstabilität entsteht, welche im fortgeschrittenen Verlauf eine spontane Fusion nach sich zieht [8], [14], scheint dies durchaus nachvollziehbar. Dies soll im folgenden näher erläutert werden.

## **1.5 Instabilität im Rahmen der Degeneration**

Es existiert keine allgemein anerkannte Definition für eine segmentale Instabilität des lumbalen Bewegungssegmentes. Zum spinalen Bewegungssegment zählen zunächst einmal zwei Wirbel mit allem dazwischenliegenden Weichteilgewebe. [15] Es wird propagiert, dass die Wirbelsäule im Gesamten aus ‚3 Säulen‘ besteht, die die Last der Bewegung abfangen und damit für Stabilität sorgen: 1. die vordere Säule, bestehend aus dem vorderen Längsband und dem anterioren Teil der Wirbelkörper und der Bandscheiben, 2. die mittlere Säule, bestehend aus dem posterioren Teil der Wirbelkörper und Bandscheiben und dem hinteren Längsband und 3. die hintere Säule mit den Pedikeln, den Wirbelbögen, den Facettengelenken sowie den Dornfortsätzen und allen dazugehörigen ligamentären Strukturen. [16]

Innerhalb eines Bewegungssegmentes gibt es multiple Bewegungsmöglichkeiten innerhalb von 6 Freiheitsgraden. Rotation und Translation können jeweils sagittal, axial und coronar durchgeführt werden, also entlang einer x-, einer y- und einer z-Achse. [17] Die Bewegungen treten zudem meist kombiniert auf. [15]

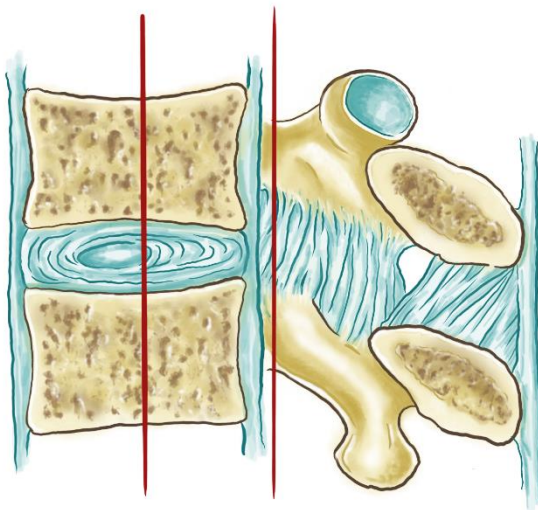


Abbildung 6: 3-Säulen-Modell der  
Wirbelsäulenstabilität

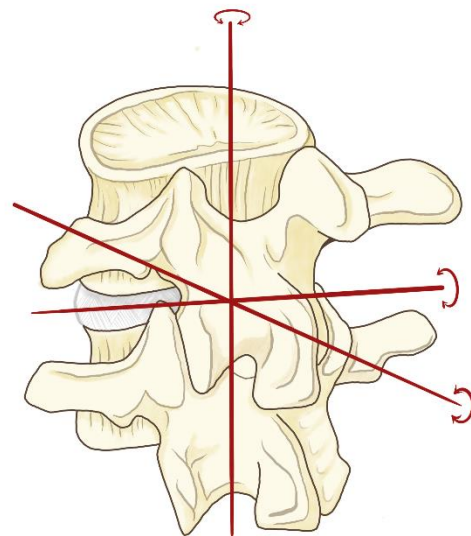


Abbildung 6: Bewegungsachsen des  
spinalen Bewegungssegmentes

Im Rahmen der Degenerationskaskade kommt es nun zu Veränderungen an allen an der Stabilität beteiligten Komponenten. Die Degeneration des lumbalen Bewegungssegmentes verläuft in drei Stadien. Zunächst kommt es bei beginnender, teils noch reversibler Degeneration zum Stadium der temporären Dysfunktion, in der erstmals eine Symptomatik beobachtet werden kann. Dies geht über in die instabile Phase, die charakterisiert ist durch einen Höhenverlust der Bandscheibe, Laxizität der Bänder und Gelenkkapseln und daraus resultierend einer (Mikro-)Instabilität des Bewegungssegmentes. In Phase 3, der Phase der Stabilisation, kommt es durch den Kollaps der Bandscheibe und zunehmende Ausprägung von osteophytären Formationen zur Restabilisierung und schlussendlich zur autologen Spondylodese des Segmentes. [14] Diese Phasen sind allerdings nicht immer klar voneinander zu unterscheiden und gehen ineinander über.

## 1.6 Bildgebende Kriterien der Degeneration und Instabilität

Bei der Entwicklung einer Instabilität können alle Komponenten des Bewegungssegmentes eine Rolle spielen: Wirbelkörper, Facettengelenke und Gelenkkapseln, Bandscheiben, Bänder, Muskeln und sogar die neurale Kontrolle über Lage- und Spannungssensoren. [18]

Die Degeneration des Bewegungssegmentes spiegelt sich in der Bildgebung wider. So haben sich im wissenschaftlichen und klinischen Gebrauch einige Gradings zur objektivierbaren Dokumentation der Degeneration der einzelnen Komponenten des Bewegungssegmentes etabliert. Diese sollen im folgenden kurz vorgestellt werden.

Die geläufigste Einschätzung der Degeneration der Bandscheibe ist das Pfirrmann Grading. 2001 veröffentlichten Pfirrmann et al. eine Klassifikation der lumbalen Bandscheibendegeneration, die anhand von T2-gewichteten sagittalen MRT-Bildern erhoben wird. Hierbei konnte eine ausgezeichnete Intra- und Interobserver-Reliabilität nachgewiesen werden [19], was rasch zu einer breiten internationalen Adaption führte.

Bereits 1988 entwickelten Modic et al. eine Klassifizierung der Osteochondrose anhand sagittaler T1- und T2-gewichteter MRT-Bilder. Die Signalveränderungen des Knochenmarkes im Bereich der Wirbelkörperabschlussplatten wurden mit histologischen Veränderungen korreliert und in zwei Degenerationsgrade eingeteilt. [20] Noch im selben Jahr wurde von den Autoren ein Grad 3 eingeführt. [21] Die Anwendung dieses Gradings ist in den internationalen Standardgebrauch eingegangen.

Zur Einteilung einer (Pseudo-)Spondylolisthese werden üblicherweise die Meyerding Grade genutzt. [22] Diese gehören zum Standardrepertoire aller Radiologen und Wirbelsäulenchirurgen. Zur diffizilen Quantifizierung leichtgradiger Versatzbildung ist leider

keine adäquate Klassifikation vorhanden, so dass wahrscheinlich die prozentuale Messung des Versatzes in Relation zur Länge der Grundplatte des kranialen Wirbelkörpers am sinnvollsten erscheint. [23]

Zur Differenzierung der Facettengelenksarthrose hat es im Gegensatz zu den bisher genannten Klassifikationen verschiedene, allerdings weitgehend ähnliche Ansätze gegeben. Am gebräuchlichsten sind die Pathria Kriterien modifiziert nach Weishaupt. Pathria führte zunächst 1987 Kriterien für die Osteoarthritis der Facettengelenke anhand von axialen CT-Bildern ein [24]. Weishaupt zeigte die Übertragbarkeit der Kriterien auf MRT-Bildgebung. [25]

Zunehmend gerät nicht nur die Makroinstabilität, gemessen an der Meyerding Graduierung, und die Arthrose der Facettengelenke in den Fokus der bildgebenden Degenerations- und Instabilitätskriterien, sondern auch die Konfiguration der Gelenke sowie das sogenannte „facet fluid sign“. So postulierte Mailleux 1998, dass flüssigkeitsgefüllte Facettengelenke in der MRT-Darstellung Zeichen einer Makroinstabilität sind. [26] Seither folgten multiple Veröffentlichungen, die diese Annahme untermauern. So konnten Snoddy et al. zum Beispiel eine signifikante Korrelation zwischen dem Flüssigkeitssignal im Facettengelenk und einer Instabilität herstellen. Mit jedem Millimeter Zunahme des Flüssigkeitssignals im Gelenk stieg das Risiko einer Instabilität um 41,6%. Ein Flüssigkeitssignal von <0,5mm war mit einer 90%igen Sicherheit verbunden, dass keine Instabilität vorliegt. [27]

Darüberhinaus scheint die Konfiguration der Gelenke (Facettengelenkwinkel) insbesondere im Seitenvergleich ein positiver Prädiktor für eine Instabilität zu sein. Eine Asymmetrie wird als Facettentropismus bezeichnet. [28] Eine Einteilung dieses Facettentropismus erfolgte durch Vanharanta, wobei eine Asymmetrie von 7-15° eine milde, von mehr als 15° eine schwere Form darstellt. [29]

Zu guter Letzt sind natürlich globale Parameter zu berücksichtigen, die allerdings in der MRT Bildgebung nur bedingt abgebildet werden können. Benditz et al. untersuchten die Vergleichbarkeit der globalen Lordose zwischen Röntgenaufnahmen im Stehen und MRT-Liegendaufnahmen. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied in den beiden Modalitäten, wobei dieser konstant bei  $2,9^\circ$  lag. Daraus wird gefolgert, dass die Lordose in den Liegendaufnahmen zumindest valide abgeschätzt werden kann. Für Segmentlordosen ließ sich diese Korrelation leider nicht herstellen. [30] Damit ist leider auch der einzige spinopelvine Parameter, der potentiell in der MRT dargestellt ist - Sakral Slope - hier nicht adäquat abzubilden.

Mit diesen Parametern sind sowohl die Degeneration der einzelnen Komponenten des Bewegungssegmentes, als auch das globale sagittale Alignment abgebildet. Allerdings kann eine Instabilität oder Fehlstellung nicht nur in Sagittalebene bestehen, sondern auch in Coronarebene. Zur Beschreibung des globalen coronaren Alignment kann der Cobb-Winkel genutzt werden. [31] Dieser quantifiziert allerdings ebenfalls eine eher globale Fehlstellung. In Bezug auf den Bandscheibenprolaps ist vor allem die Knickfehlstellung im betreffenden Segment interessant. Diese kann zwar indirekt über asymmetrische Modic-Veränderungen aufgezeigt, aber nicht quantifiziert werden. Hierfür ist bisher kein Parameter etabliert. Daher wird als Hilfsinstrument ein adaptierter, monosegmentaler Cobb-Winkel zur Quantifizierung einer Achsabweichung in Coronarebene angewandt.

## **1.7 Geschichte der endoskopische Bandscheibenoperationen**

1973 und 1975 beschrieben Kambin und Hijikata unabhängig voneinander erstmals eine perkutane Methode zur indirekten Dekompression der lumbalen Bandscheibe mittels einer Craig-Kanüle. Rasch experimentierte man mit dickeren Arbeitskanülen und flexiblen Faszangen. Der logische nächste Schritt war der Wunsch nach Visualisierung des Operationsgebietes. So dokumentierten Forst und Hausman 1983 erstmals den Einsatz eines modifizierten Arthroskopes. Nachdem 1990 erneut Kambin eine anatomisch sichere Zone definierte, das sogenannte Kambin-Dreieck, nach kranial begrenzt durch die



austretende Nervenwurzel, nach medial begrenzt durch die vorbeiziehende Nervenwurzel und nach kaudal begrenzt durch den Pedikel des kaudalen Wirbels, konnte die endoskopische Bandscheibenchirurgie erheblich vorangebracht werden.

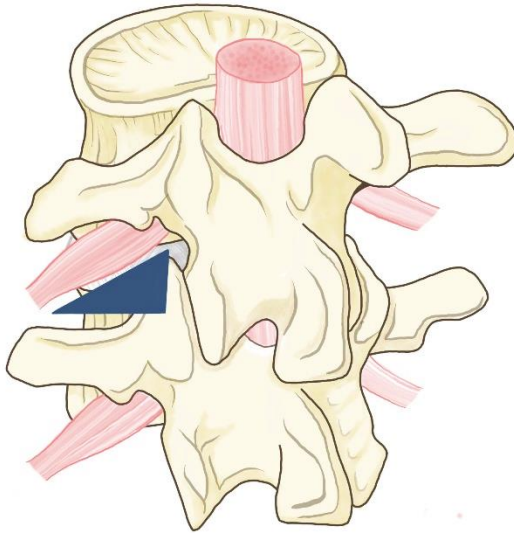


Abbildung 7: Kambin'sches Dreieck

1993 führten Mayer und Brock eine abgewinkelte Optik ein, die eine verbesserte Visualisierung ermöglichte. Die Technik der direkten Foraminoskopie wurde erstmals von Mathews 1996 beschrieben. 2005 begannen Schubert und Hoogland, auch mit Fräsen zu arbeiten. Seit der Einführung von Endoskopen mit adäquaten Arbeitskanälen durch Tsou et al. 1997 und Ruetten et al. 2007 und der folgenden technischen Verbesserung von Optik und Instrumentarium erhielten die endoskopischen Verfahren zunehmend Einzug in das Standardrepertoire vieler Neurochirurgen. [32]

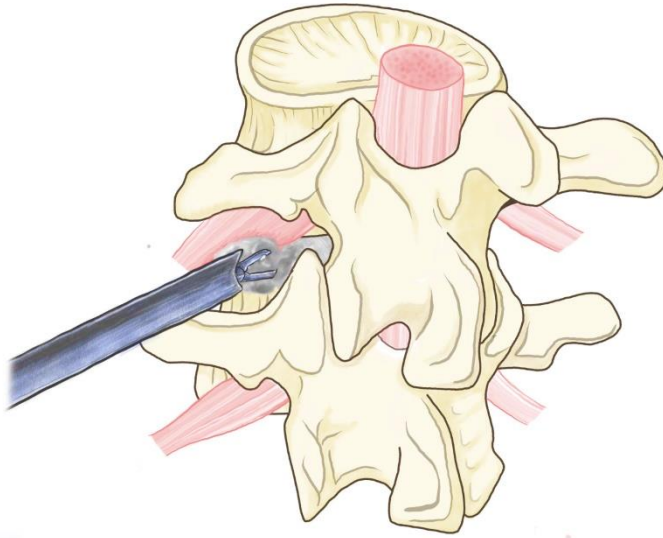


Abbildung 8: endoskopische Sequestrektomie

Insbesondere zur Dekompression intra- oder extraforaminaler Bandscheibenherniationen hat sich die endoskopische Technik etabliert. Die Vorteile liegen insbesondere in der signifikant kürzeren Operations- und Hospitalisierungszeit und damit mutmaßlich einer relevanten Kostenreduktion. [33], [34], [35] Der atraumatische Zugang führt zu einer geringeren Narbenbildung, einer geringeren muskulären Denervation und einem geringeren Risiko einer postoperativen Instabilität [35], [36] bei vergleichbaren klinischen Ergebnissen und Komplikations- bzw. Reoperationsraten. [33], [34], [35] Durch die kontinuierliche Spülung herrschen hervorragende Sichtverhältnisse (36) und es kommt zu einem antiinflammatorischen Effekt. [3] Insbesondere auch für adipöse Patienten bietet die Technik Vorteile. [36] Nachteilig wirkt sich zunächst die flache Lernkurve aus, da die Technik eine gute Hand-Auge-Koordination erfordert. So zeigte sich etwa eine signifikant höhere Reoperationsrate bei in dieser Technik unerfahrenen Chirurgen. [37]

## **1.8 Die perkutane endoskopische Sequestrektomie von posterolateral in der Foraminal-retreat-Technik**

Die Operation findet in Bauchlage statt. Thorax, Becken und die distalen Unterschenkel werden mit Lagerungskissen unterpolstert, die Knie auf Geringen gelagert. Durch Abknicken des Tisches auf Höhe des Beckens wird die Lendenwirbelsäule zusätzlich entlordosiert. In der axialen MRT wird die Einstichstelle für die Punktion der Bandscheibe ermittelt. Hierfür wird eine Linie vom Zentrum der Bandscheibe über die laterale Begrenzung der Gelenkfacette bis zur Haut gezogen und der Abstand von diesem Punkt an der Haut bis zur Mittellinie gemessen. Der Einstichwinkel liegt hierbei üblicherweise bei etwa 45°. Im seitlichen Strahlengang wird nun mit dem Bildwandler die senkrechte Achse zum Bandscheibenfach ermittelt und angezeichnet sowie anschließend der ausgemessene Eintrittspunkt auf dieser Achse markiert. Nach sterilem Abwaschen und Abdecken erfolgt das Team Time Out. Nun erfolgt die Platzierung der Diskographiekannüle im Zentrum der Bandscheibe. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Kanüle unter ständigem Knochenkontakt am Rand der oberen Gelenkfacette vorbeigleitet. Die Lage der Kanüle wird nun noch einmal im seitlichen und a.p. Strahlengang kontrolliert und dokumentiert. Nach Entfernen des Mandrains wird ein Führungsdraht in das Bandscheibenzentrum vorgeschoben und die Punktionskanüle entfernt. An der Haut erfolgt eine Stichinzision. Anschließend wird über den Führungsdraht ein Dilatator bis knapp distal des Anulus fibrosus eingebracht, hierzu wird gegebenenfalls der Dilatator mit dem Hammer vorangetrieben. Die Dilatatorlage wird nun nicht mehr verändert, während der Führungsdraht entfernt und die Arbeitshülse über den Dilatator ebenfalls knapp distal des Anulus fibrosus platziert wird. Ab hier beginnt der Einsatz des Endoskopes. Unter Sicht werden mit der Faszange zunächst intradiskale Sequester entfernt. Große Fragmente können nicht über den Arbeitskanal geborgen werden, sondern müssen zusammen mit dem Endoskop durch die Arbeitshülse entfernt werden. Sind keine weiteren Sequester aus dem Bandscheibenfach selbst zu mobilisieren, wird unter vorsichtigen Rotationsbewegungen die Arbeitshülse über die Hinterkante luxiert und nach kranial und lateral im Neuroforamen ausgerichtet. Hierbei wird die Nervenwurzel selbst durch die Hülse nach lateral verlagert. Häufig können hier bereits freie Sequester geborgen werden,

die bei diesem Manöver in den Arbeitsschaft migrieren. Geschieht dies nicht, wird der Arbeitsschaft minimal weiter zurückgezogen, so dass die Nervenwurzel von kranial medial nach kaudal lateral verlaufend sichtbar wird. Unter Schonung der Nervenwurzel wird nun unter Sicht der oder die Sequester mit dem Dissektor mobilisiert und wiederum mit der Faszange entfernt. Der Spinalnerv kommt schlussendlich kompressionslos in dem ihn umgebenden Fettgewebe zu liegen. [36] Schlussendlich erfolgt eine punktgenaue Blutstillung mittels bipolarer Koagulation, sofern notwendig. Das Endoskop wird entfernt, ein mit Volon A40 getränktes Stück Gelasponschwamm wird in die Arbeitshülse eingebracht und mit dem Endoskop an die Nervenwurzel platziert. Nun werden Arbeitshülse und Endoskop gemeinsam entfernt. Die Wunde wird mittels einzelner Rückstichnaht nach Donati mit Prolene 2-0 Faden verschlossen. Anschließend erfolgt eine abschließende Desinfektion und das Aufbringen eines sterilen Verbandes sowie die Umlagerung in Rückenlage.

Im weiteren postoperativen Verlauf werden die Patienten ab dem ersten postoperativen Tag unter krankengymnastischer Anleitung voll remobilisiert. Das Nahtmaterial wird nach 7 Tagen entfernt.

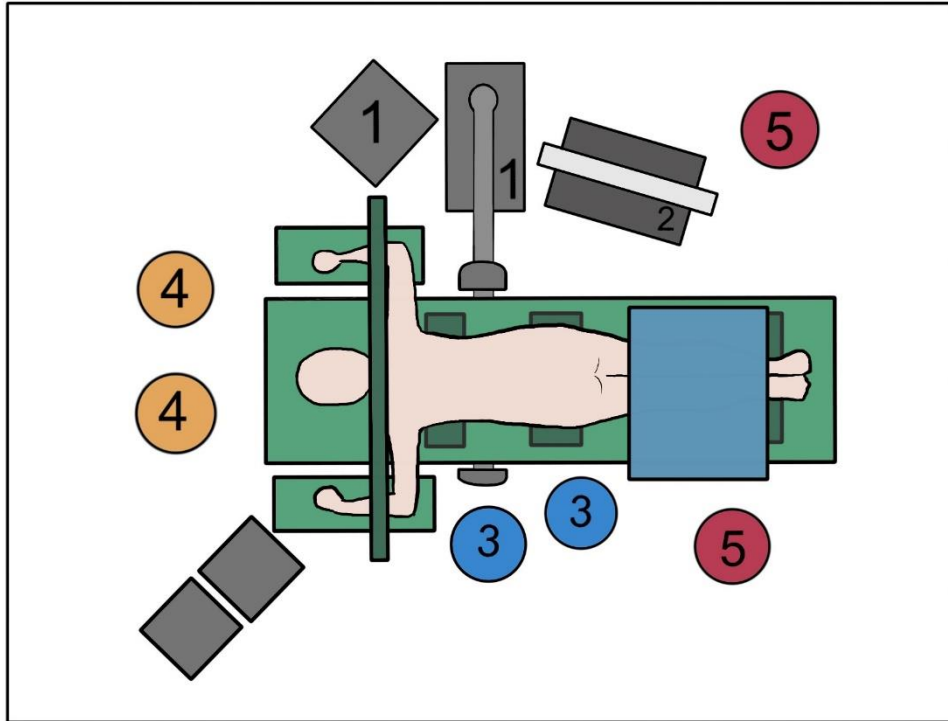


Abbildung 10: Aufbau des Operationssaales

1 Bildwandler, 2 Monitor, 3 Chirurg, 4 Anästhesie, 5 OP Pflege



Abbildung 11: Bandscheibenprolaps  
LWK4/5 links, T2 sagittal

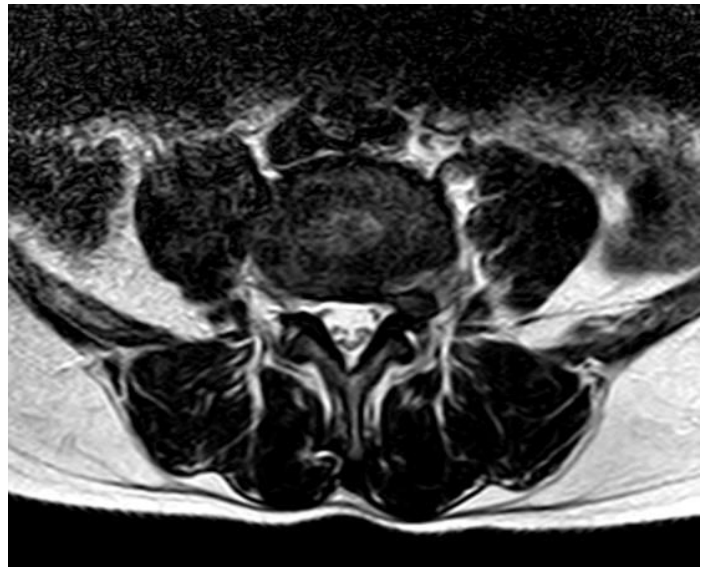


Abbildung 12: Bandscheibenprolaps LWK4/5 links,  
T2 axial

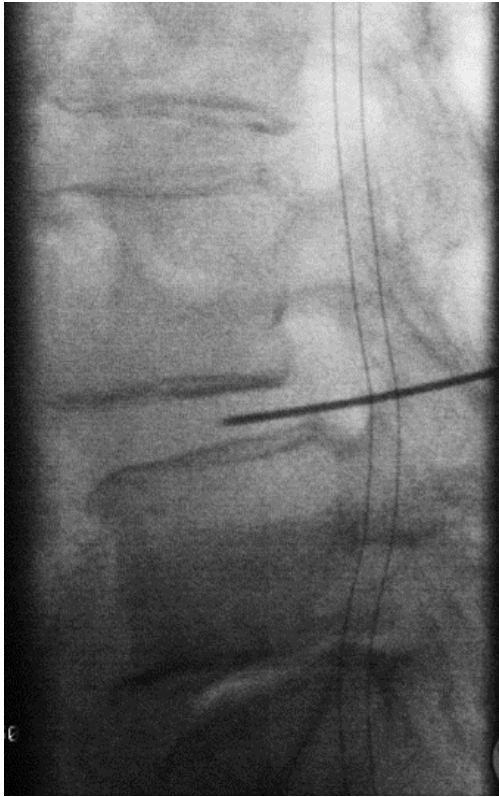


Abbildung 13: Punktieren der Bandscheibe, seitlicher Strahlengang

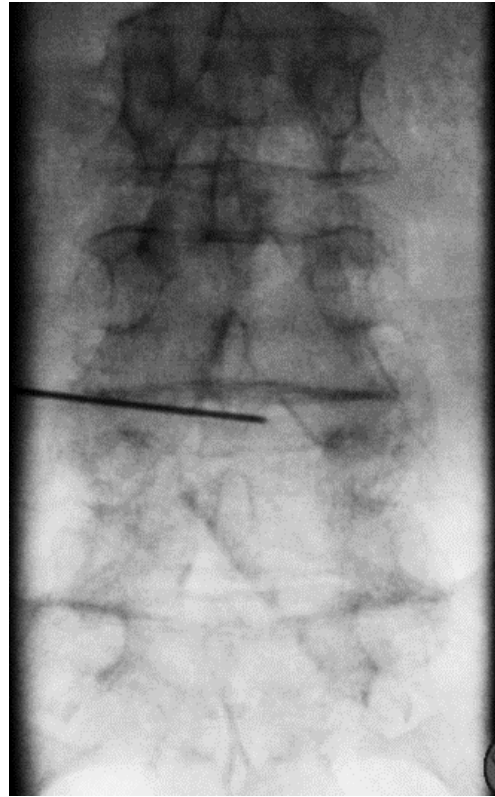


Abbildung 14: Punktieren der Bandscheibe, a.p. Strahlengang



Abbildung 15: endoskopische Sicht ins Bandscheibeninnere, knapp distal des Anulus fibrosus

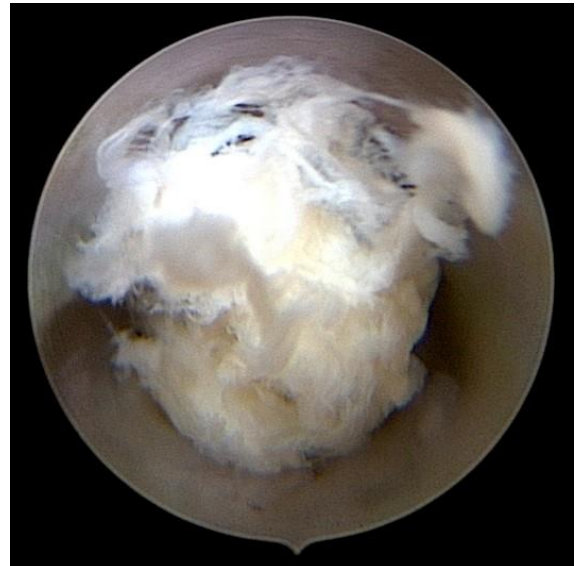


Abbildung 16: Prolabieren des Sequesters in den Arbeitsschaft nach vorsichtiger Retraktion



Abbildung17: restlicher Sequester  
komprimiert die Nervenwurzel

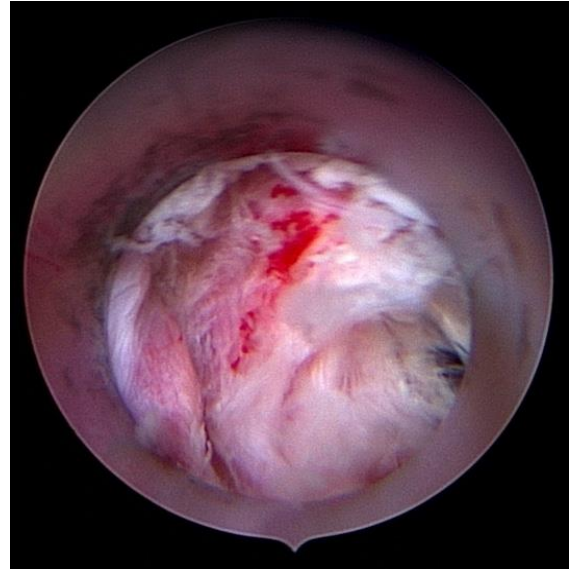


Abbildung 18: Blick in das Neuroforamen nach  
abgeschlossener Sequestrektomie

## **1.9 Zielstellung**

In der Literatur liegt die Rezidivrate bei endoskopisch operierten intra- oder extraforaminalen Bandscheibenvorfällen bei 0,5-15% [38], [39], [40], [41], die Revisionsrate bei 1%-11%. [38], [42], [40] Die Ursache hierfür ist bisher nicht geklärt, die meisten Autoren schlossen jedoch Patienten mit Instabilität oder Skoliose von vorneherein aus [43], [44], [45] oder vermuteten einen Zusammenhang zwischen einer bestehenden Instabilität und dem Auftreten eines Rezidivs. [39], [46]

Üblicherweise besteht die präoperative Diagnostik der Patient\*innen mit lumbalem Bandscheibenprolaps in einer MRT der Lendenwirbelsäule. Bestehen keine weiteren Deformitäten, ist eine weiterführende Röntgendiagnostik oder Computertomographie weder zielführend, noch aus Strahlenschutzaspekten gerechtfertigt. Prädiktive Faktoren für den Operationserfolg sollten sich also im Idealfall an der ohnehin zur Indikationsdiagnostik vorhandenen Bildgebung messen lassen.

Ziel der Arbeit soll sein, radiologische Kriterien anhand der präoperativen MR-Bildgebung zu definieren, die mit dem Auftreten eines Rezidivprolaps korrelieren und einen Score zu entwickeln, der das Risiko eines Therapieversagens abschätzen kann. Mit diesem Instrument sollen Patient\*innen besser beraten werden können, insbesondere wenn es um die Fragestellung einer endoskopischen Operation versus einer primären Dekompressions- und Stabilisierungsoperation geht.

## **1.10 Hypothesen**

1. Es gibt Kriterien in der präoperativen MRT, die mit dem Auftreten eines operationspflichtigen Rezidivprolaps nach endoskopischer Operation bei intra- und extraforaminalen Bandscheibenherniationen korrelieren.



2. Es kann definiert werden, inwiefern diese Kriterien das Auftreten eines operationspflichtigen Rezidivprolaps beeinflussen.

3. Aus der Kombination der MRT-Kriterien lässt sich eine individuelle Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Rezidivprolaps nach endoskopischer Operation bei intra- und extraforaminalen Bandscheibenherniationen herleiten. Die individuelle Wahrscheinlichkeit lässt sich zur Vereinfachung in der klinischen Anwendung in einem Score abschätzen.

## 2 Methoden

### 2.1 Patient\*innenkollektiv

Die endoskopische Sequestrektomie von posterolateral wird in der Klinik für Neurochirurgie des BG Klinikums Bergmannstrost in Halle seit Dezember 2013 angewandt, in erster Linie für intra- bzw. extraforaminale Bandscheibenvorfälle. Zunächst wurden alle Operationen, für die in der OP Anmeldung die Prozedur ‚Bandscheibenvorfall lumbal, endoskopisch‘ hinterlegt wurde, identifiziert und die dazugehörigen Patient\*innen dokumentiert. Ausgeschlossen wurden Patient\*innen, die sich der Prozedur aufgrund einer anderen Diagnose unterzogen. Zwischen Dezember 2013 und Juni 2019 erfolgten 129 derartige Eingriffe. Zwei dieser Eingriffe erfolgten aufgrund einer Spondylodiszitis zur Keimgewinnung. Ein Eingriff war mit der gleichzeitigen perkutanen Stabilisierung einer Fraktur des angrenzenden Wirbelkörpers verbunden. Diese drei Patient\*innen wurden ausgeschlossen. Eine Patientin unterzog sich der gleichzeitigen Operation zweier Bandscheibenvorfälle im zeitgleichen Operationssetting, diese wurde zunächst mit eingeschlossen.

Die verbliebenen Patient\*innen sollten nun auf die Zielgröße „operationspflichtiges Rezidiv“ hin nachuntersucht werden. Hierfür wurde ein Fragebogen erarbeitet, der an alle 126 Patient\*innen per Post versandt wurde. In diesem wurde folgendes abgefragt:

1. *Litten oder leiden Sie **nach** der Operation bzw. nach der Entlassung erneut an anhaltenden **Beinschmerzen** wie vor der Operation?*
2. *Wurde **nach** der Operation noch einmal eine **MRT-Untersuchung der Lendenwirbelsäule** durchgeführt?*

*Wenn ja, wann und wo?*

3. Wurden Sie **nach** der endoskopischen Operation noch einmal in einer **anderen** Klinik an der Lendenwirbelsäule behandelt (gespritzt oder operiert)?

*Wenn ja, wann und wo?*

Dies erfolgte nach positivem Votum durch die Ethikkommission der Landesärztekammer Sachsen-Anhalt am 05.05.2020.

Nach einer Latenz von etwa 2 Monaten erfolgte die telefonische Kontaktaufnahme mit den Patient\*innen, die den Fragebogen bis dahin nicht zurückgesandt hatten. Vorausgesetzt des Einverständnis der Patient\*innen wurde der Fragebogen in diesem Fall schlussendlich per Telefoninterview erarbeitet.

25 Patient\*innen waren weder postalisch noch telefonisch über die hinterlegten Kontaktdaten erreichbar. Fünf Patient\*innen waren zwischenzeitlich verstorben. Sieben Patient\*innen lehnten die Teilnahme ausdrücklich ab. Ein Patient erlitt zwischenzeitlich ein schwerstes Schädel-Hirn-Trauma. Eine weitere Patientin musste sich bereits zwei Monate nach der initialen Operation der Stabilisierung des betreffenden Segmentes bei osteoporotischer Wirbelkörperfraktur unterziehen.

Die Patient\*innen, die angaben, in einer anderen Klinik infiltriert oder operiert worden zu sein bzw. extern zwischenzeitlich eine MRT der LWS erhalten zu haben, wurden um eine Erklärung zur Entbindung von der Schweigepflicht gebeten. Mit dieser wurden in der entsprechenden Einrichtung die Befunde angefragt. Anhand der vorliegenden internen Patientenakten bzw. der eingeholten Befunde wurden die Patient\*innen in zwei Gruppen eingeteilt:

- 1) Patient\*innen ohne operationspflichtigen Rezidivbandscheibenprolaps
- 2) Patient\*innen, die einen Rezidivbandscheibenprolaps erlitten, der zu einer erneuten Operation führte

Patient\*innen, die alle Fragen mit „nein“ beantwortet haben und nicht in der Klinik für Neurochirurgie des BG Klinikum Bergmannstrost Halle an einem Rezidivbandscheibenprolaps operiert wurden, wurden zur ersten Gruppe gezählt. Patient\*innen, die angaben, weiterhin unter Beinschmerz zu leiden, aber keine Bildgebung oder erneute Therapie erhalten haben, wurden ebenfalls der ersten Gruppe zugeordnet. Dies wurde als neuropathischer Schmerz oder konkurrierende Schmerzursache gewertet. Da bei Patient\*innen, die keinen erneuten oder persistierenden Beinschmerz angaben, aber dennoch eine aktualisierte Bildgebung erhalten haben, nicht von einem symptomatischen Rezidivprolaps auszugehen ist, wurden diejenigen in die zweite Gruppe sortiert. Bei allen anderen wurden die auswärtigen Befunde und Arztbriefe angefordert und studiert, ggf. ebenfalls telefonisch, um die Zuordnung zu einer Gruppe festzulegen. Sofern eine erneute Operation im selben Segment auf der selben Seite stattgefunden hat, erfolgte die Zuordnung zur zweiten Gruppe.

Nun wurde die präoperative Bildgebung der in Frage kommenden 87 Patient\*innen gescreent. In 84 Fällen lag eine präoperative MRT der LWS vor. In 3 Fällen wurde die Diagnose anhand einer CT der LWS gestellt. Diese Fälle wurden aufgrund der Nichterhebbarkeit einiger Degenerationsparameter ebenfalls ausgeschlossen.

In die Auswertung einbezogen wurden schlussendlich 84 der 129 in endoskopischer Technik operierten Patient\*innen.

## 2.2 Erhebung der Stammdaten

Aus der elektronischen Patientenakte wurde nun für diese Patient\*innen das Geschlecht und das Alter zum Operationszeitpunkt dokumentiert. Aus dem Aufnahmezustand wurden der Body Mass Index und der Raucherstatus eruiert. Informationen über Anamnesedauer, das Vorhandensein sensomotorischer Defizite, die Höhe der Läsion, Voroperationen im entsprechenden Segment und die Dauer des stationären Aufenthaltes sowie mögliche Reoperationen in domo wurden aus den Arztbriefen erhoben. Eine mögliche Diabeteserkrankung wurde ebenfalls über den Arztbrief bzw. die Prämedikationsdokumentation überprüft. Das Datum des Fragebogens entspricht dem letzten Follow up Datum.

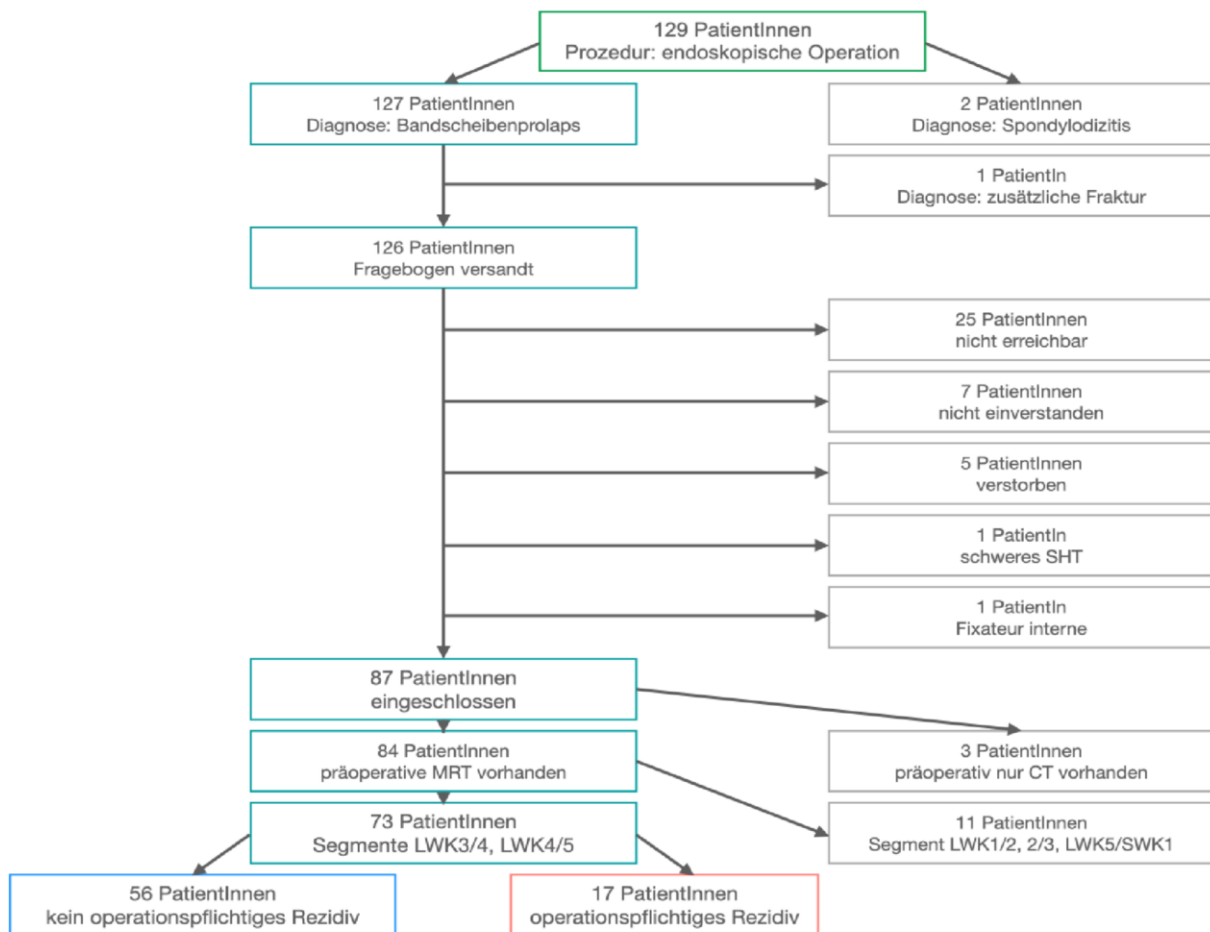


Abbildung 19: Patient\*innenaquise

## 2.3 Erhebung der Degenerations-/Instabilitätsparameter anhand der präoperativen MRT der LWS

Die jeweils aktuellste MRT der LWS vor dem Operationszeitpunkt wurde nun zur Erhebung der bildgebenden Parameter herangezogen. Zunächst erfolgte die Beurteilung der Bandscheibendegeneration des betreffenden Segmentes nach dem Pfirrmann Grading im sagittalen T2-Bild. Eine homogene, hyperintense Struktur mit klarer Unterscheidbarkeit zwischen Nucleus pulposus und Anulus fibrosus bei normaler Bandscheibenhöhe entspricht dem Grad 1. Eine inhomogene, weiterhin hyperintense Struktur mit oder ohne horizontalen Banden, weiterhin mit klarer Unterscheidbarkeit zwischen Nucleus pulposus und Anulus fibrosus bei normaler Bandscheibenhöhe entspricht dem Grad 2. Grad 3 präsentiert sich mit einer inhomogenen Struktur und intermediären Signalintensität, wobei hier weiterhin Nucleus pulposus und Anulus fibrosus klar unterscheidbar sind. Die Bandscheibenhöhe ist allenfalls leicht vermindert. Eine inhomogene, intermediär bis hypointense Bandscheibe mit verllorener Differenzierbarkeit zwischen Nucleus pulposus und Anulus fibrosus und moderat verminderter Bandscheibenhöhe bildet den Grad 4 ab. Das Maximum der Degeneration ist mit der kollabierten, hypointens „schwarzen“ Bandscheibe im Grad 5 erreicht. [19]

Tabelle 1: Degeneration der Bandscheibe nach Pfirrmann, T2 sagittal

Grad	Struktur	Nucleus/Anulus	Signalintensität	Bandscheibenhöhe
1	homogen, weiß	klar unterscheidbar	hyperintens, isointens zu Liquor	normal
2	inhomogen, mit/ ohne horizontalen Banden	klar unterscheidbar	hyperintens, isointens zu Liquor	normal
3	inhomogen, grau	unklar unterscheidbar	intermediär	normal bis leicht vermindert
4	inhomogen, grau bis schwarz	verlorene Differenzierbarkeit	intermediär bis hypointens	normal bis moderat vermindert
5	inhomogen, schwarz	verlorene Differenzierbarkeit	hypointens	kollabiert

Die Degeneration der Wirbelkörperabschlussplatten, also der Osteochondrose, mit dem Modic Grading erfolgte anhand der sagittalen T1- und T2-Wichtungen. Grad 0 zeigt keinerlei Signalveränderungen der Abschlussplatten des betreffenden Segmentes im Vergleich zum Wirbelkörper selbst. Bei einer hypointensen Veränderung in T1 und hyperintensen Veränderung des Signals in T2 spricht man von Modic Grad 1. Findet sich auch in T1 eine hyperintense Signalstörung, besteht ein Modic Grad 2. Grad 3 ist gekennzeichnet durch eine in beiden Wichtungen hypointense Struktur. [20]

Tabelle 2: Osteochondrosegrade nach Modic, T1/T2 sagittal

Grad	T1	T2
0	keine Veränderung	keine Veränderung
1	hypointens	hyperintens
2	hyperintens	iso-/hyperintens
3	hypointens	hypointens

Eine Bewertung der Segmentinstabilität in Sagittalebene erfolgt in der Standardliteratur über die Meyerding Grade. Bei Meyerding wird der Grad der Spondylolisthese anhand des prozentualen Versatzes angegeben: <25% entspricht Grad 1, 25-50% Grad 2, 50-75% Grad 3 und 75-100% Grad 4. Grad 0 bedeutet es besteht keinerlei Versatz, Grad 5 entspricht einer Spondyloptose. [22] Da bei einem höhergradigen Segmentversatz zumeist eine Makroinstabilität und damit die Indikation zur Stabilisierung des Segmentes besteht, wird hier zur feineren Differenzierung zusätzlich der prozentuale Versatz in Relation zur Grundplatte des kranialen Wirbelkörpers verwendet, wie durch Laurent et al. eingeführt. [23]

Bei der Messung des Absolutwertes in mm wurde der Abstand zwischen der Projektion der Hinterkante des kranialen und der Hinterkante des kaudalen Wirbelkörpers im sagittalen

T2-Bild gemessen. Für die prozentuale Angabe wurde dieser Abstand in Relation zur Gesamtlänge der Grundplatte gesetzt.



Abbildung 20: Messung des prozentualen  
Wirbelkörperversatz

Die Arthrose der Facettengelenke nach Pathria/Weishaupt wurden im axialen T2-Bild untersucht. Ein normaler Gelenkspalt von 2-4mm Breite entspricht Grad 0. Bei Auftreten von kleineren Osteophyten, leichter Gelenkhypertrophie und/oder einer Verschmälerung des Gelenkspaltes auf <2mm spricht man von Grad 1. Ein verschmälerter Gelenkspalt <1mm mit moderaten Osteophyten und/oder moderater Gelenkhypertrophie sowie ggf. leichten knöchernen Arrosionen entspricht Grad 2. Eine Degeneration des Grades 3 weist dann einen kollabierten Gelenkspalt („bone to bone“) sowie ausgeprägte Osteophyten, eine ausgeprägte Gelenkhypertrophie und/oder ausgeprägte knöcherne Arrosionen mit subchondralen Zysten auf. [24], [25]



Tabelle 3: Facettenarthrose nach Pathria/Weishaupt, T2 axial

<b>Grad</b>	<b>Aussehen des Gelenkes</b>
<b>0</b>	normaler Gelenkspalt (2-4mm Breite)
<b>1</b>	verschmälerter Gelenkspalt (<2mm) und/oder kleine Osteophyten und/oder leichte Gelenkhypertrophie
<b>2</b>	verschmälerter Gelenkspalt (<1mm) und/oder moderate Osteophyten und/oder moderate Gelenkhypertrophie und/oder leichte knöcherne Arrosioinen
<b>3</b>	verschmälerter Gelenkspalt (bone to bone) und/oder ausgeprägte Osteophyten und/oder ausgeprägte Gelenkhypertrophie und/oder ausgeprägte knöcherne Arrosioinen und/oder subchondrale Zysten

Als weiteres Zeichen der Degeneration und Instabilität der Facettengelenke wurde das facet fluid sign erhoben. Als negativ wurde dies bei fehlender Hyperintensität des Gelenkspaltes gewertet. Bei einer Hyperintensität des Gelenkspaltes von <1mm wird von einem leichten, bei 1-2mm von einem mittelschweren, bei >2mm von einem ausgeprägten Flüssigkeitssignal gesprochen.

Tabelle 4: Flüssigkeitszeichen der Facettgelenke (facet fluid sign), T2 axial

<b>Ausprägung</b>	<b>Hyperintensität des Gelenkspaltes</b>
negativ	keine Veränderung
leicht	<1mm
mittel	1-2mm
ausgeprägt	>2mm

Die Facettenwinkel wurden im axialen T2-Bild gegen die Mittellinie gemessen. Nach Vanharanta wurde anhand der Differenz der Winkel im Seitenvergleich kein Facettentropismus bei  $<7^\circ$  Seitenunterschied, ein leichter Facettentropismus bei  $7-15^\circ$  und ein ausgeprägter Facettentropismus bei über  $15^\circ$  attestiert. [29]

Der Lordosewinkel wurde im sagittalen T2-Bild zwischen der Deckplatte von LWK1 und der Grundplatte LWK5 gemessen.



Abbildung 21: Messung der Facettenwinkel im axialen T2-Bild



Abbildung 22: Messung des Lordosewinkels im sagittalen T2-Bild

Für die Messung des segmentalen coronaren Cobb-Winkels musste die MRT Untersuchung im Programm Canon Vitrea Version 7.11.4.12 rekonstruiert werden. Hier wurde eine coronare T2-Sequenz aus den ursprünglichen Bilddaten akquiriert und der Winkel zwischen der Deckplatte des kranialen und der Grundplatte des kaudalen Wirbelkörpers gemessen.

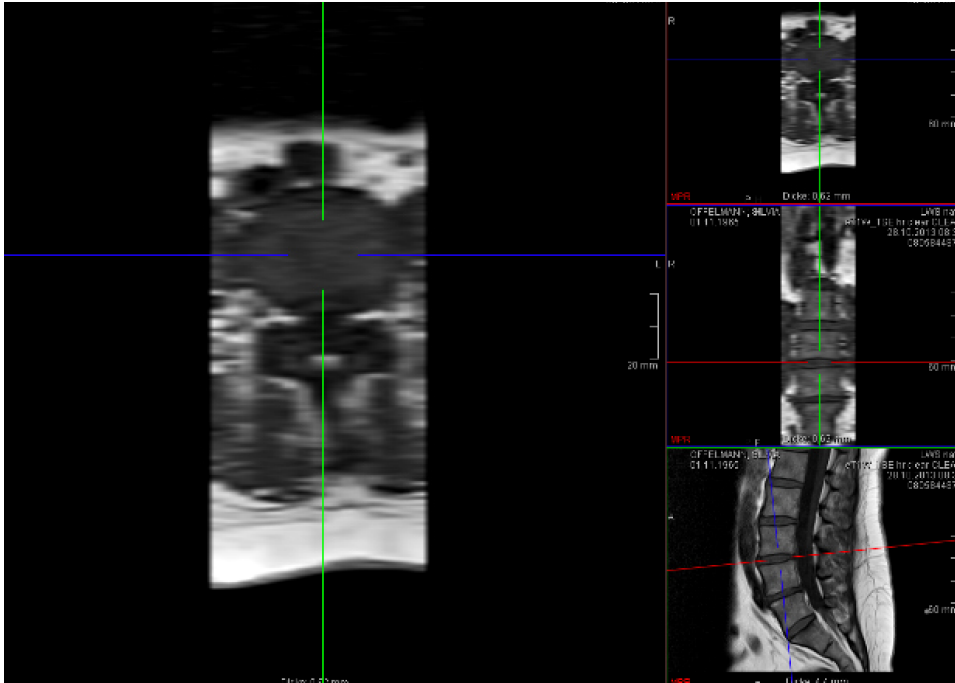


Abbildung 23: Rekonstruktion der Bilddaten im Programm Canon Vitrea

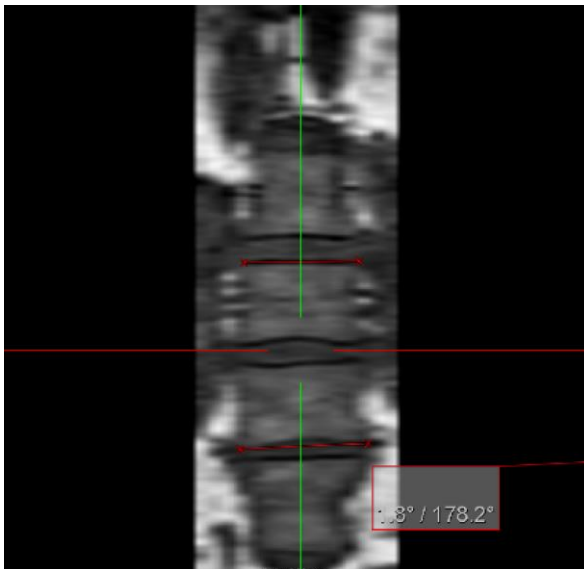


Abbildung 24: Messung des coronaren Cobb-Winkels anhand der rekonstruierten coronaren Bilder

## 2.4 Statistische Auswertung

Die Patient\*innen wurden zunächst in die Gruppen „Rezidiv“ und „kein Rezidiv“ eingeteilt. Die Gruppen werden im folgenden Rezidivgruppe R (Patient\*innen mit operationspflichtigem Rezidiv) und Kontrollgruppe K (Patient\*innen ohne operationspflichtiges Rezidiv) benannt.

Zu Beginn erfolgte eine isolierte Betrachtung der abhängigen Variablen im Hinblick auf das Auftreten eines Rezidivbandscheibenprolaps. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Zur Überprüfung der Unabhängigkeit des Auftretens eines Rezidivs wurden die kategorischen Parameter Geschlecht, Segment, Raucher und Diabetiker mittels Chi<sup>2</sup>-Test (exakter Test nach Fisher qua geringer Stichprobengröße) untersucht.

Die ordinal skalierten bzw. nicht normal verteilten und metrischen Variablen wurden in Hinblick auf Unterschiede zwischen den Gruppen mittels Mann-Whitney-U-Test verglichen: hierzu gehören der Body Mass Index, die Anamnesedauer, die Aufenthaltsdauer und die postoperative Aufenthaltsdauer und das Follow up; bei den bildmorphologisch erhobenen Parametern sind dies die Klassifikationen nach Pfirrmann, nach Modic und nach Pathria/Weishaupt, der segmentale Versatz in %, das Flüssigkeitszeichen der Facettengelenke, der Facettentropismus und der coronare Cobb-Segmentwinkel.

Die normalverteilten Variablen Alter und Lordosewinkel wurden via T-Test für unabhängige Stichproben verglichen.

Für die dichotomen Variablen sensible und motorische Defizite, stattgehabte Voroperationen und die Meyerding-Klassifikation (da in der Stichprobe nur Grad 0 und Grad 1 vorkommend) wurde erneut der Chi<sup>2</sup>-Test (exakter Test nach Fisher) genutzt.

Zur Vorhersage eines Rezidivs erfolgte die logistische Regression. Hierzu wurden zunächst die in der isolierten Betrachtung signifikanten Parameter einzeln der logistischen

Regression unterzogen. Zu guter Letzt erfolgte noch die multivariate logistische Regression der relevanten Parameter.

Das statistische Signifikanzniveau wurde in allen Tests auf 5% festgelegt. Die Auswertung erfolgte mit IBM SPSS for Windows, Version 27.0. Armonk, NY: IBM Corp.

## **3 Auswertung**

### **3.1 Einschluss in die Studie**

Über die zuvor genannten Suchkriterien konnten 127 Patient\*innen identifiziert werden, die in endoskopischer Technik operiert worden sind. Davon unterzogen sich 127 Patient\*innen der Prozedur aufgrund eines Bandscheibenprolaps, bei zwei Patient\*innen bestand eine Spondylodiszitis. Bei einer der 127 Patient\*innen bestand zusätzlich eine Fraktur des angrenzenden Wirbelkörpers. Von den übrigen 126 Patient\*innen gelang schlussendlich bei 87 das Follow up. Hiervon wurden drei anhand einer präoperativen CT statt MRT operiert. Die verbleibenden 84 Patient\*innen konnten in die Untersuchung eingeschlossen werden.

Insgesamt mussten hiervon 17 Patient\*innen an einem Rezidivbandscheibenprolaps operiert werden (20%). Die betroffenen Segmente waren zu 2% LWK1/2, zu ebenfalls 2% LWK2/3, zu 32% LWK3/4, zu 55% LWK4/5 und zu 8% LWK5/SWK1. Rezidive traten ausschließlich bei Patient\*innen auf, die im Segment LWK3/4 oder LWK4/5 operiert worden sind, so dass zur Homogenisierung der Stichprobe ausschließlich diese beiden Segmente in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden.

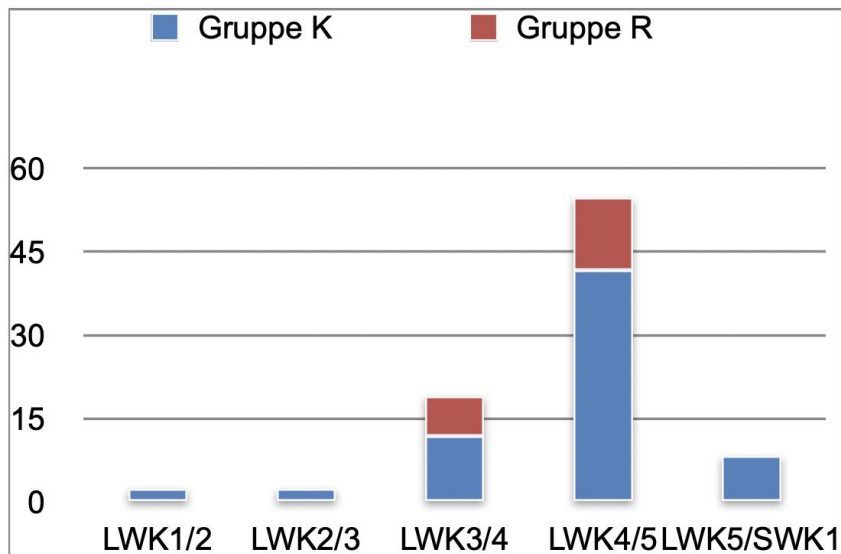


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung Patient\*innen und Rezidive

Betrachtet man nun die 73 Patient\*innen, die in den Segmenten LWK3/4 und LWK4/5 operiert wurden, beträgt die Zahl der Rezidive insgesamt 23%.

### 3.2 Allgemeiner Gruppenvergleich

Die Patient\*innen waren durchschnittlich 60 Jahre alt (28-81 Jahre). Hierbei gab es keinen signifikanten Unterschied in den Gruppen (R  $\bar{x}$  63 Jahre  $\pm$  9/48-76 Jahre; K  $\bar{x}$  59 Jahre  $\pm$  12/28-81 Jahre;  $p=0,258$ ). 58% der Patient\*innen waren männlich, 42% weiblich. Auch dies unterschied sich nicht signifikant in den beiden Gruppen (R 59% ♂ / 41% ♀; K 57% ♂ / 43% ♀;  $p=1,000$ ). Der durchschnittliche Body Mass Index lag bei 28 kg/m<sup>2</sup> bei einer Spanne zwischen 20-40 kg/m<sup>2</sup>. Erneut zeigt sich hier kein Gruppenunterschied (R  $\bar{x}$  29 kg/m<sup>2</sup>  $\pm$  5 bei 21-40 kg/m<sup>2</sup>, K  $\bar{x}$  28 kg/m<sup>2</sup>  $\pm$  4 bei 20-36 kg/m<sup>2</sup>;  $p=0,484$ ). 29% der Patient\*innen waren Raucher. Der geringe Unterschied zwischen den Gruppen (R 35%, K 27%) ist hierbei nicht signifikant ( $p=0,547$ ). An Diabetes litten 16% der operierten Patient\*innen, auch hier zeigt sich ein geringes, jedoch nicht signifikantes Ungleichgewicht (R 24%, K 14%;  $p=0,456$ ).

Das betroffene Segment war abermals gleich verteilt: in der Rezidivgruppe war dies zu 35% das Segment LWK3/4 und zu 65% das Segment LWK4/5, in der Kontrollgruppe 37,5% das Segment LWK3/4 und 62,5% das Segment LWK4/5 ( $p=1,000$ ). Der durchschnittliche stationäre Aufenthalt betrug 7 Tage (von 2-30 Tage), wobei der durchschnittliche postoperative Aufenthalt sich auf 5 Tage belief (von 1-24 Tage). Hierbei verblieben die Patient\*innen der Rezidivgruppe einen (halben) Tag länger auf Station ( $\bar{x}$  5 Tage  $\pm$  3 gegenüber K  $\bar{x}$  4,5 Tage  $\pm$  3). Dieser minimale Unterschied war wiederum nicht signifikant ( $p=0,479$ ). 4 Patient\*innen waren bereits voroperiert (5%), davon eine in der Rezidivgruppe (6%) und 3 in der Kontrollgruppe (5%;  $p=1,000$ ). Hierbei handelte es sich um Dekompressionsoperationen auf der Gegenseite im selben Segment (3 Patient\*innen) bzw. eine Stabilisierung im kaudalen Anschlusssegment (1 Patientin). Zum Zeitpunkt der Erstoperation litten 34% der Patient\*innen unter akuten, weniger als 2 Wochen bestehenden Beschwerden, ebenfalls 34% unter subakuten Beschwerden zwischen 2-6 Wochen, 14% beklagten Symptome seit 6-12 Wochen und 18% berichteten über eine Anamnesedauer von >12 Wochen. Hierbei reichten insgesamt die Angaben von 3 Tagen bis 1 Jahr. Es findet sich auch hier kein signifikanter Gruppenunterschied ( $p=0,221$ ).

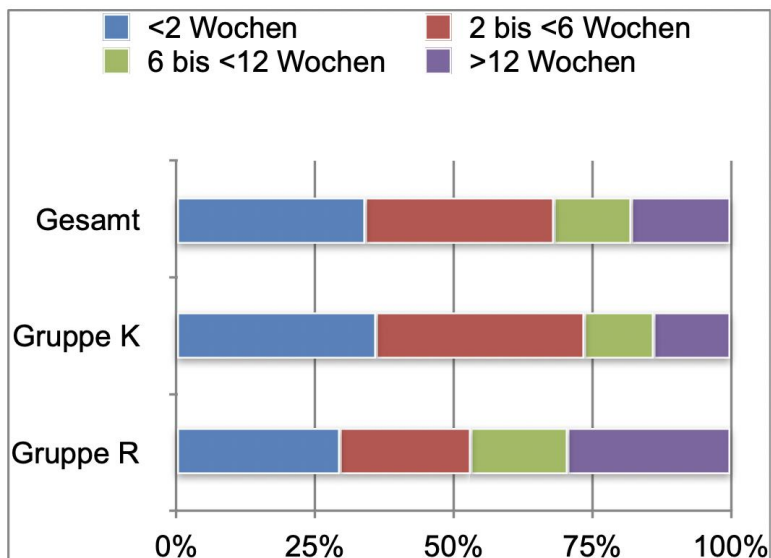


Abbildung 26: Anamnesedauer



Klinisch boten die Patient\*innen neben dem radikulären Beinschmerz in 38% der Fälle sensible Defizite (R  $\emptyset$  41%, K  $\emptyset$  38%,  $p=0,784$ ) in 36% der Fälle auch motorische Defizite (R  $\emptyset$  41%, K  $\emptyset$  34%;  $p=0,579$ ). Die Operation selbst dauerte zwischen 10 und 70 Minuten, im Mittel 33 Minuten.

Das Follow up betrug durchschnittlich 1445 Tage (~4 Jahre), wobei das kürzeste Follow up ~11 Monate betrug, das längste ~6,5 Jahre. Auch hier ergab sich kein signifikanter Gruppenunterschied (R  $\emptyset$  1397 Tage  $\pm$  584, K  $\emptyset$  1460 Tage  $\pm$  577;  $p=0,695$ ). Bis auf zwei Patient\*innen erfolgte die Operation des Rezidivprolaps jeweils innerhalb eines Jahres (3 Tage bis 11 Monate nach Erstoperation). Ein Rezidiv trat erst nach 4,5 Jahren auf.

### **3.3 Univariate Betrachtung der Degenerations- und Instabilitätsparameter**

Die bildmorphologisch erhobenen Parameter wurden nun zunächst der univariaten Betrachtung unterzogen.

Zum überwiegenden Teil zeigten die betroffenen Bandscheiben eine Degeneration von mindestens Pfirrmann Grad 3. Pfirrmann Grad 1 ist in der Stichprobe nicht vertreten. Pfirrmann Grad 2 fand sich lediglich bei einem Patienten in der Gruppe K (1% gesamt, K 2%). Die allermeisten Bandscheiben wiesen Degenerationserscheinungen der Pfirrmann Grade 3 (45%) und 4 (45%) auf, wobei sich hier eine höhergradige Schädigung in der Rezidivgruppe (3° in 18%, 4° in 59%) gegenüber der Kontrollgruppe (3° in 54%, 4° in 41%) zeigte. Auch die 8% der Patient\*innen, die sich in Pfirrmann Grad 5 einstufen ließen, waren deutlich häufiger in der Rezidiv-Gruppe zu finden (R 24%, K 4%). Dieser Unterschied in den beiden Gruppen war mit  $p=0,002$  signifikant.

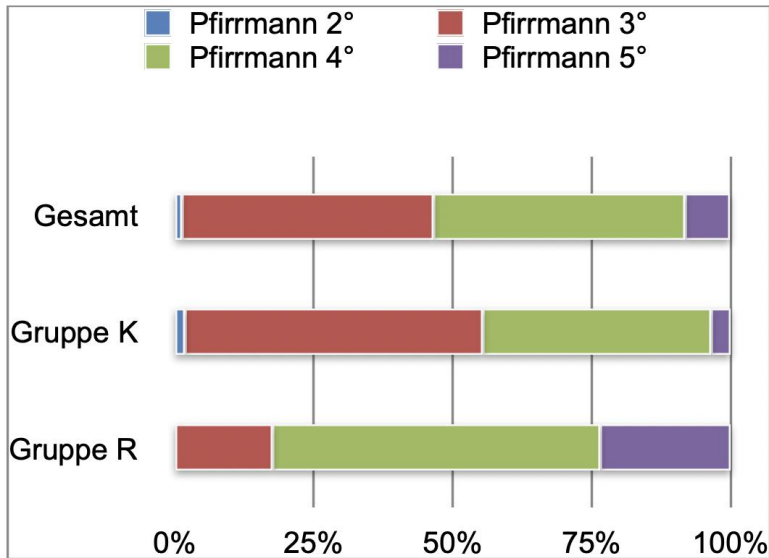


Abbildung 27: Degeneration der Bandscheibe nach Pfirrmann

Die Degeneration der Abschlussplatten, klassifiziert nach Modic, wies ebenfalls einen signifikanten Gruppenunterschied auf ( $p=0,01$ ). Auch hier zeigten die Patient\*innen in der Rezidivgruppe eine höhergradige Degeneration. Keinerlei Modic-Veränderungen wiesen 78% der Patient\*innen in der Gesamtbetrachtung auf, wobei hier in der Kontrollgruppe 86% und in der Rezidivgruppe nur 53% einzuordnen waren. Modic Grad 1 zeigte sich bei 4% aller Patient\*innen, dies allerdings ausschließlich in der Rezidivgruppe (18%). Von Grad 2 Veränderungen waren insgesamt 16% betroffen, mit 29% wiederum mehr in der Rezidivgruppe als 13% in der Kontrollgruppe. Modic Grad 3 kam lediglich bei einem Patienten (1%) vor, dieser war nicht von einem Rezidiv betroffen (K 2%).

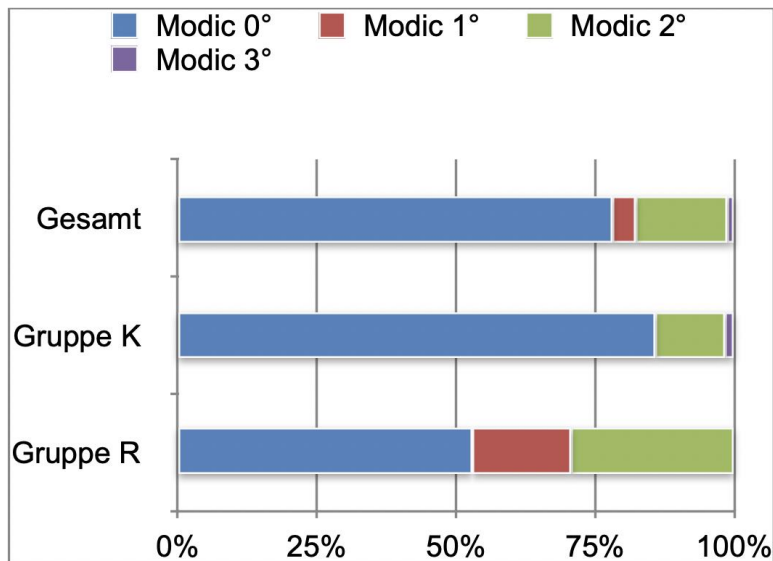


Abbildung 28: Modic-Veränderungen

Indikationsgemäß traten bei der Klassifizierung des Segmentversatzes nach Meyerding nur die Grade 0 und 1 auf. In der Grundgesamtheit zeigten 92% keinen Segmentversatz in der Sagittalebene. Dies unterschied sich nicht wesentlich in den beiden Gruppen (R 88%, K 93%;  $p=0,619$ ). Betrachtet man den prozentualen Versatz, ergibt sich auch hier kein wesentlicher Unterschied: 3% wiesen einen Versatz von 1-5% in Relation zur Grundplatte des kranialen Wirbelkörpers auf, 7% einen 6-9%igen Versatz. In den Gruppen zeigte sich hier in der Kontrollgruppe 5% mit einem 1-5%igen Versatz, 5% mit einem 6-9%igen Versatz, in der Rezidivgruppe waren es ausschließlich Patienten mit einem 6-9%igen Versatz (12%). Dieser Effekt wies keine statistische Signifikanz auf ( $p=0,692$ ).

Über die Degeneration der Bandscheibe und der Wirbelkörperabschlussplatten kommen wir nun zur Degeneration der Facettengelenke, graduiert nach Pathria/Weishaupt. Hier erfolgte die Unterscheidung in ipsilaterales und kontralaterales Facettengelenk. Sowohl ipsi- als auch kontralateral zeigte lediglich ein Patient keinerlei Degenerationserscheinungen, einem Grad 0 entsprechend (1%). Dieser befand sich in der Kontrollgruppe (2%). 37% zeigten eine milde erstgradige Degeneration der ipsilateralen Facettengelenke (K 38%, R 29%). Bei 42% konnten ipsilateral moderate, Grad 2

entsprechende, Veränderungen beobachtet werden (K 41%, R 47%). Schwerwiegende Degenerationserscheinungen zeigten sich bei 19% in der Grundgesamtheit, tendentiell etwas mehr in der Rezidivgruppe (K 20%, R 24%). Diese Beobachtung erreicht keine statistische Signifikanz ( $p=0,471$ ). Kontralateral zeigten sich vergleichbare Ergebnisse: Grad 1 in 34% (K 34%, R 29%), Grad 2 in 44% (K 45%, R 53%) und Grad 3 bei 21% (K 20%, R 18%), auch hier ohne Signifikanz ( $p=0,773$ ).

Auch die Flüssigkeitszeichen der Facettengelenke wurden in ipsi- und kontralateral unterschieden. Kein facet fluid sign wiesen 79% aller Patient\*innen auf, mit 80% etwas mehr in der Kontrollgruppe als in der Rezidivgruppe mit 76%. Ein leichtgradig positives Flüssigkeitszeichen zeigten 5% insgesamt (K 7%, R 6%). Mittelschwer ließen sich 8% Patient\*innen einordnen (K 9%, R 6%). Das ausgeprägte Flüssigkeitszeichen zeigten 5%, wobei dies in der Rezidivgruppe mit 12% etwas überwog (K 4%). Erneut konnte diese Beobachtung nicht durch statistische Signifikanz untermauert werden ( $p=0,644$ ). Kontralateral zeichnet sich abermals ein ähnliches Bild: 85% der Patient\*innen wiesen kein Flüssigkeitszeichen auf (K 82%, R 94%). Ein leichtes Flüssigkeitszeichen bot sich bei 5%, ausschließlich in der Kontrollgruppe (7%). Auch ein mittelschweres Flüssigkeitszeichen wurde nur in der Kontrollgruppe beobachtet (gesamt 7%, K 9%). Die ausgeprägten Befunde (3%) überwogen erneut in der Rezidivgruppe mit 6% gegenüber 2% in der Kontrollgruppe. Ebenfalls finden wir hier kein signifikantes Ergebnis ( $p=0,271$ ).

Bei der Messung der Facettenwinkel war eine ausgesprochen hohe Varianz zu verzeichnen. Diese reichte von 11-75°. Im Mittel lag der Winkel ipsilateral bei 42° und kontralateral bei 43° ohne bedeutende Gruppenunterschiede (ipsilateral K 42° ± 12, R 40° ± 11 bei  $p=0,453$ ; kontralateral K 44° ± 12, R 43° ± 11 bei  $p=0,763$ ). Interessant hierbei ist sicherlich nicht unbedingt der Winkel selbst, sondern mit dem Tropismus die Seitendifferenz. Bei 53% der Patient\*innen konnte kein Facettentropismus gesehen werden, bei 38% ein leichter und bei 16% ein ausgeprägter. In der Rezidivgruppe überwog der Anteil der Patient\*innen ohne Tropismus deutlich (71%), ein leichter kam in 29% der Fälle vor, ausgeprägte Differenzen waren hier überhaupt nicht zu verzeichnen. In der

Kontrollgruppe bestand in 41% der Fälle ein leichter, in 21% der Fälle ein ausgeprägter Tropismus, lediglich 48% wiesen keine relevanten Facettenwinkelunterschiede je Seite auf. Mit einem p-Wert von 0,075 bestand hier nur knapp keine Signifikanz.

Als einziger Parameter, der das Segment in der Coronarebene untersucht, folgt der coronare Cobb-Segmentwinkel. Dieser lag durchschnittlich bei 3° und bewegte sich im Bereich zwischen 0° und 32°. In der Rezidivgruppe lag sowohl der Maximalwert (32° vs. 8°) als auch der Mittelwert mit 6° ± 8° signifikant über der Kontrollgruppe mit 2° ± 2° (p=0,010). Ein noch klareres Bild zeichnet sich, wenn die Knickrichtung mit einbezogen wird. In der Rezidivgruppe zeigte die Knickrichtung in 88% der Fälle zur Pathologie hin, in der Kontrollgruppe war dies nur in 54% der Fall (gesamt 62%). Bei Beachtung der Vorzeichen (+ bedeutet ‚zur Pathologie hin geknickt‘, - bedeutet ‚Knick von der Pathologie weg‘) steigt das Signifikanzniveau sogar auf p=0,001. Hier zeigen sich Werte von -8° bis +8° in der Kontrollgruppe ( $\emptyset$  +1° ± 3°), in der Rezidivgruppe -6° bis +32° ( $\emptyset$  +6° ± 8°).

Schlussendlich soll noch die Gesamtlordose als globaler Parameter Beachtung finden. Auch hier zeigte sich eine große Spannweite an Ergebnissen. Der Lordosewinkel der LWS betrug durchschnittlich 31° bei Werten zwischen 6° und 74°. Signifikante Unterschiede in den Gruppen ergaben sich hier nicht (K 31°, R 29°; p=0,545).

### **3.4 Logistische Regression der signifikanten Parameter**

Die in der univariaten Analyse signifikanten Parameter wurden nun zunächst einzeln, dann blockweise der linearen Regression unterzogen.

Beginnen wir mit dem segmentalen Cobb-Winkel. Hier zeigt sich für das Regressionsmodell ein p-Wert 0,648 und damit eine fehlende Signifikanz. Die Modellgüte nach Nagelkerkes R<sup>2</sup> liegt bei lediglich 0,004, d.h. dass nur 0,4% der Varianz der Variable

Rezidiv durch die Variable Cobb-Winkel erklärt werden können. Die Ergebnisse sollen hier dennoch aufgezeigt werden.

Tabelle 5: logistische Regression der Variable "segmentaler Cobb-Winkel"

	<b>RegressionskoeffB</b>	<b>sig./Signifikanz</b>	<b>Exp(B)/Odd's Ratio</b>	<b>Konfidenzintervall</b>
<b>Cobb-Winkel</b>	0,02	0,652	1,020	0,935 - 1,114

Die Höhe des Cobb-Winkels hat also einen prinzipiell positiven, aber nicht signifikanten Einfluss auf das Auftreten eines Rezidives. Steigt der Cobb-Winkel um 1° (Knickrichtung in Richtung der Pathologie), erhöht dies das relative Risiko des Auftretens eines Rezidivs um 2%. Auch dieser quantitative Zusammenhang ist mit dem Konfidenzintervall, welches 1 einschließt, statistisch nicht signifikant.

Bei der Pfirrmann Graduierung zeigt sich bereits ein Signifikanz des Regressionsmodells mit  $p < 0,001$  bei einem Nagelkerkes  $R^2$  von 0,477.

Tabelle 6: logistische Regression der Variable „Degeneration der Bandscheibe/Pfirrmann“

	<b>RegressionskoeffB</b>	<b>sig.</b>	<b>Exp(B)</b>	<b>Konfidenzintervall</b>
<b>Pfirrmann 2°</b>		<0,001		
<b>Pfirrmann 3°</b>	-21,203	1,000	<0,001	0,000 - .
<b>Pfirrmann 4°</b>	-2,303	<0,001	0,100	0,031 - 0,328
<b>Pfirrmann 5°</b>	-0,833	0,028	0,435	0,207 - 0,913

Die Pfirrmann Grade 3, 4 und 5 haben einen negativen Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidives im Vergleich zu Pfirrmann Grad 2. Hierbei zeigt sich nur für Grad 4 und Grad 5 eine Signifikanz. Ein/e Patient\*in mit einer Bandscheibendegeneration Pfirrmann Grad 4 hat ein 10% geringeres relatives Risiko, ein Rezidiv zu entwickeln, als ein/e Patient\*in mit einer Degeneration Pfirrmann Grad 2. Bei einer/m Patient\*in mit einer Degeneration Pfirrmann Grad 5 sinkt das relative Risiko um 44% gegenüber Pfirrmann Grad 2. Auch diese beiden Ergebnisse sind signifikant.

Für die Veränderungen der Abschlussplatten nach Modic kann auch hier Signifikanz erreicht werden ( $p < 0,001$ ). Die Modellgüte nach Nagelkerkes  $R^2$  liegt bei 0,477.

Tabelle 7: logistische Regression der Variable „Degeneration der Abschlussplatten/Modic“

	<b>RegressionskoeffB</b>	<b>sig.</b>	<b>Exp(B)</b>	<b>Konfidenzintervall</b>
<b>Modic 0°</b>		<0,001		
<b>Modic 1°</b>	-1,674	<0,001	0,187	0,092 - 0,382
<b>Modic 2°</b>	21,203	0,999	1.615.474.842,851	0,000 - .
<b>Modic 3°</b>	-0,336	0,999	0,714	0,227 - 2,251

Im Vergleich zu Patient\*innen ohne Modic-Veränderungen treten bei Modic Grad 1 und Modic Grad 3 weniger Rezidive auf. Modic Grad 2 erhöht die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidivs. Signifikant ist hierbei nur die Beobachtung bei Modic Grad 1. Hier führt das Vorhandensein dieser Veränderungen der Abschlussplatten zu einer 19%ig erhöhten relativen Wahrscheinlichkeit, ein Rezidiv zu entwickeln, als Patient\*innen ohne Modic-Veränderungen bei signifikantem Ergebnis.

Bringt man nun blockweise alle drei Variablen in die logistische Regression ein, zeigt sich wohl das aussagekräftigste Ergebnis mit einer Signifikanz von  $< 0,001$  und einem

Nagelkerkes  $R^2$  von 0,685. Es können also 69% der Rezidive über die Werte der drei Variablen Cobb-Winkel, Pfirrmann-Grade und Modic-Veränderungen erklärt werden.

Tabelle 8: Multiple logistische Regression aller drei Variablen

	<b>RegressionskoeffB</b>	<b>sig.</b>	<b>Exp(B)</b>	<b>Konfidenzintervall</b>
<b>Cobb-Winkel</b>	0,250	0,028	1,284	1,027 - 1,605
<b>Pfirrmann 2°</b>		0,099		
<b>Pfirrmann 3°</b>	-20,847	1,000	<0,001	0,000 - .
<b>Pfirrmann 4°</b>	-3,584	0,013	0,028	0,002 - 0,471
<b>Pfirrmann 5°</b>	-1,399	0,188	0,247	0,031 - 1,979
<b>Modic 0°</b>		0,147		
<b>Modic 1°</b>	0,381	0,130	0,683	0,087 - 5,395
<b>Modic 2°</b>	23,006	<0,001	9.802.431.586,414	0,000 - .
<b>Modic 3°</b>	-0,161	0,022	0,851	0,103 - 7,044

Wir sehen also auch in der Kombination der drei Einzelvariablen, dass der segmentale Cobb-Winkel einen signifikanten positiven Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidivs hat. Dieser Effekt kann quantitativ (ebenfalls signifikant) mit einem 28% höheren relativen Risiko pro Grad Winkelunterschied angegeben werden. Eine Degeneration der Bandscheibe Pfirrmann Grad 4 weist hier ebenfalls, wie in der einzelnen Regressionsanalyse, eine signifikante negative Korrelation mit einem Rezidiv auf. Im Vergleich zu einem/r Patient\*in mit Pfirrmann Grad 2 sinkt das relative Risiko signifikant um 3%. Für Pfirrmann Grad 5 kann hier wiederum kein signifikantes Ergebnis gezeigt werden. Die Modic Veränderungen Grad 2 und Grad 3 weisen in diesem Modell eine signifikante Korrelation auf, wobei ein Modic Grad 2 die Auftretenswahrscheinlichkeit eines



Rezidives erhöht, ein Modic Grad 3 diese senkt. Quantitativ kann dies leider nicht signifikant abgebildet werden.

## **4 Diskussion**

### **4.1 Allgemein**

Auch in der Klinik für Neurochirurgie des BG Klinikum Bergmannstrost stellen intraforaminale Bandscheibenvorfälle nur etwa 10% aller lumbal zu operierenden Bandscheibenvorfälle dar. Mit der Einführung der endoskopischen Operationsmethode konnte diesen Patient\*innen eine vielversprechende, minimalinvasive Operationsmethode angeboten werden. Hierbei decken sich die klinischen Parameter mit den Angaben in der Literatur. Auch in unserem Patient\*innenkollektiv sahen wir die Segmente LWK3/4 und LWK4/5 bevorzugt betroffen, gefolgt vom Segment LWK5/SWK1. Auch das frühe Eintreten der sensomotorischen Defizite spiegelt sich darin wieder, dass diese bei mehr als 1/3 der operierten Patient\*innen beklagt wurden. Die allgemeinen Risikofaktoren für das Auftreten von Bandscheibenvorfällen Rauchen, Diabetes und Übergewicht [47] hatten in dieser Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten eines Rezidivprolaps, wenn gleich hierfür jeweils eine Tendenz zu Gunsten der Rezidivgruppe zu verzeichnen war. Dass die Methode durchaus und insbesondere für adipöse Patient\*innen in Frage kommt, wird auch hier noch einmal mit dem durchschnittlichen ( $28 \text{ kg/m}^2$ ) und maximalen Body Mass Index ( $40 \text{ kg/m}^2$ ) unterstrichen. Mit einer Operationszeit von durchschnittlich 33 Minuten und einer postoperativen Liegedauer von 4-5 Tagen kann auch hier der Vorteil der endoskopischen Technik im Hinblick auf die Hospitalisierung unterstrichen werden.

### **4.2 Rezidivrate**

Als wesentlicher Unterschied stellt sich hier die Rezidivrate von insgesamt 20% im Vergleich zu lediglich bis zu 15% [41] in der Literatur dar. Als ursächlich hierfür muss zunächst die Erfahrung des Operateurs diskutiert werden. Der endoskopischen Technik wird eine außerordentlich flache Lernkurve zugeschrieben, was vor allem in der für (speziell wirbelsäulenchirurgisch orientierte) Neurochirurgen nur bedingt gewohnten

Methode der Endoskopie liegt. Hierfür wird zum einen die komplexe Hand-Auge-Koordination verantwortlich gemacht. [34] Zum anderen ist das erzeugte Bild ein zweidimensionales, nicht wie beim Mikroskop ein dreidimensionales, was ebenfalls dem Operateur die Handhabung erschweren kann. In dieser Untersuchung wurden alle Patient\*innen von einem einzigen Operateur bzw. unter dessen Supervision operiert. Dies ist insofern positiv zu bewerten, dass ein Bias durch verschiedene Ausbildungsgrade verschiedener Operateure ausgeschlossen wird. Zu Beginn der Serie bestand die Erfahrung des Operateurs vor allem aus einem Hands-on-Kurs, so dass es zunächst durchaus logisch erscheint, dass die vergleichsweise hohe Reoperationsrate auf der zunächst noch fehlenden Erfahrung beruht. Schaut man sich die einzelnen Phasen nun genauer an, so traten bei den Patient\*innen Nr. 1-50 7 dokumentierte operationspflichtige Rezidive auf (14%), bei den Patient\*innen Nr. 51-100 5 operationspflichtige Rezidive (10%), und bei den Patient\*innen Nr. 101-127 noch einmal 5 operationspflichtige Rezidive (19%). Dies scheint also nicht der ausschlaggebende Faktor zu sein. Hinzu kommt, dass die flache Lernkurve in allen Untersuchungen auf die Faktoren ‚frustrantes klinisches Ergebnis‘ oder ‚perioperative Komplikationen‘ bezogen wurden, nicht auf das Auftreten eines Rezidivs. [37] Ein weiterer Unterschied könnte in der Länge des Follow ups liegen. In der vorliegenden Untersuchung liegt die Dauer des durchschnittlichen Follow up bei etwa 4,5 Jahren. Die meisten (insbesondere die wenigen randomisierten klinischen) Studien weisen ein mittleres Follow up von ca. 24 Monaten auf [48], [49]. Teilweise betrug die Nachbeobachtungszeit lediglich 6 Monate, 12 Monate [50], [51] oder gar nur 6 Wochen. [52], [53], [54].

Lediglich 8 der 17 dokumentierten Reoperationen in dieser Serie erfolgten innerhalb der ersten 6 Wochen, das entspricht in diesem Zeitrahmen einer Komplikationsrate von 9,5% (sofern alle Lendenwirbelsegmente einbezogen werden). Betrachtet man die ersten 6 Monate postoperativ liegt die Rezidivrate bei 14%, nach 12 Monaten bei 17%. Der späteste Operationszeitpunkt der Rezidivoperation lag hier tatsächlich bei 4,5 Jahren, 3 der 17 Rezidivbandscheibenvorfälle (18%) traten später als 2 Jahre auf.

Die meisten Autoren unterscheiden zwischen ‚Reoperation‘ und ‚Rezidiv‘, ohne tatsächlich auf die ‚Reoperation aufgrund eines Rezidivs‘ im Speziellen einzugehen. Zumeist liegen

jedoch für beide Kategorien ähnliche Ergebnisse vor, so dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Zahl der operationspflichtigen Rezidive durch eine genauere Betrachtung steigt.

Schlussendlich ist sicherlich auch ein Bias aufgrund der begrenzten Patient\*innenzahl anzunehmen. Schlussendlich konnten 84 der 127 operierten Patient\*innen eingeschlossen und 73 in die Auswertung einbezogen werden. Dies ist insbesondere dem retrospektiven Charakter der Studie zuzuschreiben, da die meisten der ausgeschlossenen Patient\*innen schlicht und ergreifend nach bis zu 8 Jahren nach der Erstoperation nicht mehr unter der angegebenen Adresse oder Telefonnummer zu erreichen waren bzw. zwischenzeitlich verstorben waren.

Allerdings liegt von diesen ausgewerteten Patient\*innen ein nahezu 100% vollständiger Datensatz vor, lediglich ein einziger Wert beim Body Mass Index eines Patienten liegt nicht vor.

#### **4.3 Bewertung der Ergebnisse und Einordnung in die Literatur**

Die Haupthypothese, es seien Risikofaktoren für das Auftreten eines Rezidivbandscheibenprolaps bereits im präoperativen MRT auszumachen, kann als bestätigt gelten. Nach Ausschluss eines Bias zwischen den Gruppen bezüglich Vorerkrankungen, konstitutionellen Merkmale und Anamnese zeigten mehrere Parameter eine statistisch signifikante Korrelation mit dem primären Outcome-Parameter ‚operationspflichtiges Rezidiv‘. Hierzu gehören in der univariaten Betrachtung die Degeneration der Bandscheibe (klassifiziert nach Pfirrmann), die Degeneration der Abschlussplatten (klassifiziert nach Modic) und der monosegmentale coronare Cobb-Winkel. Der Facettentropismus war als Parameter mit  $p=0,075$  nur knapp nicht signifikant.

In der Literatur zeigt sich hierzu ein gemischtes Bild. Nur wenige Autoren betrachteten die Ursachen für das Auftreten der Rezidivbandscheibenvorfälle, insbesondere im Hinblick auf

die foraminal gelegenen. Noch weniger Daten gibt es hier zu den radiologischen Parametern.

Wang et al. konnten keine bildmorphologischen Kriterien für das Versagen der endoskopischen Operationstechnik herausfiltern. [37] Park et al. fanden eine Korrelation zwischen Modic-Veränderungen und dem Auftreten von Rezidivbandscheibenvorfällen nach endoskopischer Bandscheibenoperation und erklärten dies mit der Theorie einer bestehenden Instabilität des Segmentes. [39] Eine ähnliche Beobachtung machten Ziegler et al., sie konnten in Ihrer Studie zeigen, dass vor allem Modic Grad 2 Veränderungen ein unabhängiger Risikofaktor sind. [55]

Kim et al. konnten einen Zusammenhang zwischen der Degeneration der Bandscheibe und dem Auftreten eines lumbalen Rezidivbandscheibenprolaps generell herausarbeiten. Hierbei zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Auftreten eines Rezidivprolaps und dem Vorhandensein einer fortgeschrittenen Degeneration nach Pfirrmann in den Graden 3-5. [48] Bei Dora et al. war ein ähnliches Ergebnis für die Pfirrmann Grade 4 und 5 zu beobachten. [56]

Ausgehend von der Theorie, dass eine (Mikro-)Instabilität zum Auftreten des Rezidives führt, konnten auch in dieser Hinsicht radiologische Parameter mit dem Auftreten einer Instabilität korreliert werden. Toyone et al. und Rahme et al. brachten eher Modic Grad 1 Veränderungen mit einer Instabilität in Verbindung. [57], [58] Hasegawa et al. fanden einen Zusammenhang zwischen den Modic-Veränderungen, dem ‚facet-opening‘, (einem interartiikulären Abstand der Gelenkflächen von mehr als 1,5mm) sowie dem Vorhandensein einer subchondralen Sklerose als Zeichen der Degeneration der Facettengelenke und dem Vorhandensein einer Segmentinstabilität. [59] Jang et al. untersuchten Patient\*innen im kinetischen MRT und fanden einen Zusammenhang zwischen einer Diskopathie bzw. einer Spondylarthrose der Facettengelenke und einer Instabilität. [60] Die Korrelation zwischen einem verbreiterten Flüssigkeitssignal der Facettengelenke (üblicherweise definiert als >1mm) und einer segmentalen Makroinstabilität konnte durch verschiedene Autoren nachgewiesen werden. [61], [62]

Globale Parameter wie die Gesamtlordose oder coronare Parameter wie der hier eingeführte, (adaptierte) monosegmentale Cobb-Winkel sind in diesen Untersuchungen nahezu gar nicht zu finden.

Diese Arbeit zeigt deutlich auf, dass durchaus die präoperative MRT Bildgebung in ihren Facetten ein aufschlussreicher Prädiktor sein kann, um die Prognose einer endoskopischen Operation bei intra- oder extraforaminalem Bandscheibenprolaps abzuschätzen und damit deutlich intensiver Beachtung in der Forschung und schlussendlich präoperativen Planung finden sollte. Legt man erneut die Theorie zu Grunde, dass ein wiederholter Bandscheibenprolaps unter anderem Folge einer segmentalen Mikroinstabilität in der zweiten Phase der Degeneration nach Kirkaldy et al. [14] ist, lassen sich die Ergebnisse dieser Studie weitgehend klar einordnen.

Alle Patient\*innen wiesen erwartungsgemäß mindestens leichtgradige Degenerationen der Bandscheibe auf. Der Grad 1 nach Pfirrmann war in diesem Patient\*innenklientel überhaupt nicht vertreten, was sich dadurch erklären lässt, dass eine vollständig gesunde Bandscheibe auch keinen Prolaps erleidet. Im zweiten Stadium der Degeneration des Bewegungssegmentes, der instabilen Phase, sehen wir dann eine milde bis mittelschwere Ausprägung der Bandscheibendegeneration in den Graden 2 bis 4, in der hier entsprechend auch die meisten der Patient\*innen einen Prolaps entwickelten. Die dritte Phase, das Stadium der Restabilisation, entspricht somit der Degeneration Grad 5 nach Pfirrmann. Dies spiegelt sich in der hier wiederum marginalen Patient\*innenzahl wider. Bei der Betrachtung der statistischen Korrelation wird es hier allerdings etwas schwieriger. Zum einen legt die univariate Betrachtung mit dem Vergleich der Mittelwerte (K: 3,5; R: 4) und der Häufigkeitsverteilung eine höhergradige Schädigung der Patient\*innen mit Rezidivbandscheibenprolaps nahe. Zum anderen zeigt sich in der logistischen Regressionsanalyse eine signifikante Risikoreduktion der Grade 4 und 5 gegenüber Grad 2. Einschränkend ist hier zu sagen, dass aufgrund fehlender Patient\*innen für den Grad 1 die Ausprägung ‚Pfirrmann Grad 2‘ als Referenzwert für die Regression gilt. Die Daten sagen also aus, dass die Ausprägung ‚Pfirrmann Grad 5‘ gegenüber dem Grad 2 eine

geringere Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidivprolaps haben, nicht unbedingt aber gegenüber dem Grad 1. Für Pfirrmann Grad 4 sind die Ergebnisse zunächst widersprüchlich. Die univariate Statistik deutet darauf hin, dass vor allem Patient\*innen mit Pfirrmann Grad 4 häufiger von einem Rezidiv betroffen sind. Die logistische Regression zeigt entgegen dieser Beobachtung nun allerdings eine negative Korrelation mit der Auftretenswahrscheinlichkeit für hohe Degenerationsgrade der Bandscheibe. Einschränkend muss hier noch einmal betont werden, dass als Referenz für die Auftretenswahrscheinlichkeit eine Degeneration Pfirrmann Grad 2 gilt, da der Grad 1 nicht in der Stichprobe enthalten sind. Bei den Patient\*innen mit Pfirrmann Grad 2 handelt es sich lediglich um einen Einzelnen. Damit sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse sicher nicht abschließend verwertbar.

Dies unterstreicht dennoch abermals, dass am ehesten bei einer moderaten Degeneration der Bandscheibe entsprechend das Stadium der Instabilität besteht und damit das Risiko für das Auftreten eines Rezidivprolaps am höchsten ist, auch wenn dies nicht in der genauen Risikoanalyse der Pfirrmann-Grade zu benennen ist.

Ähnlich den Ergebnissen anderer Autoren zeigte sich auch hier, dass Modic-Veränderungen grundsätzlich in Zusammenhang mit der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidives stehen. Der überwiegende Teil der Patient\*innen in der Kontrollgruppe zeigte keinerlei Modic-Veränderungen (86%), wohingegen nur etwa die Hälfte (53%) der Patient\*innen in der Rezidivgruppe diesbezüglich unauffällig waren. Bei der genaueren Betrachtung der Graduierung in der logistischen Regression zeigt sich schlussendlich ein (leider nicht signifikant quantifizierbares) höheres relatives Risiko für den Grad 2 und eine (ebenfalls leider nicht signifikant quantifizierbare) relative Risikoreduktion für den Grad 3. Auch dies deckt sich erneut mit der Theorie der drei Phasen der Degeneration. Die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit im Rahmen der Mikroinstabilität ist auch hier im Bereich der moderaten Degeneration angesiedelt (Grad 2), die Endphase mit der Restabilisierung (und entsprechend der maximalen Degeneration der Abschlussplatten nach Modic Grad 3) zeigt eher wieder eine Risikoreduktion.

Der wohl interessanteste und aussagekräftigste Parameter in dieser Arbeit ist sicherlich der hier erstmals eingeführte, adaptierte, segmentale Cobb-Winkel zur Abbildung der Instabilität in Coronarebene. Meines Wissens nach ist dieser Parameter in dieser Form neu, und mangels etablierter Parameter, die eine Fehlstellung segmental in Coronarebene anzeigen, auch konkurrenzlos. Einschränkend muss hier erwähnt werden, dass die üblichen MRT Sequenzen keine coronare Rekonstruktion enthalten. Dies gelingt jedoch, wie hier gezeigt, mit geringem Zeitaufwand aus dem Primärdatensatz aus allen vollständig akquirierten MRT Sequenzen. In diesem Patient\*innengut konnte bei ausnahmslos allen MRT Untersuchungen, gleich welcher Qualität oder Herkunft, der vorhandene Datensatz in die coronare Rekonstruktion umgewandelt werden. Die Winkelmessung ist schlussendlich ebenfalls ausgesprochen einfach zu realisieren. Sicherlich könnte dieser Winkel auch im a.p. Röntgenbild (vorzugsweise in stehender Position) erhoben werden. Dies bedeutete aber auch eine (nicht gerechtfertigte) Strahlenexposition, da über die Winkelmessung hinaus kein weiterer Wissenszuwachs aus dieser Bildgebung erwächst.

In diesem Parameter zeigt sich insgesamt die stärkste Korrelation mit der für alle Parameter größten Auswirkung auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidivprolaps. Ein Knick in der Coronarebene bereits um  $1^\circ$  in Richtung des Prolaps erhöht die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidives um 28%.

Die Entwicklung eines Score zur Risikoabschätzung gelingt mangels eindeutiger Ergebnisse in der Regressionsanalyse (mit oben genannten Einschränkungen) anhand der vorliegenden Datenlage sicherlich nicht adäquat und muss zunächst unterbleiben.

#### **4.4 Kritik**

Einschränkungen dieser Untersuchung sind selbstverständlich zunächst einmal der retrospektive Charakter. Zum anderen spielt sicherlich die hohe drop-out Rate eine Rolle bei der Qualität der Ergebnisse, diese ist erneut hauptsächlich mit dem retrospektiven Studiendesign zu erklären. Zu guter Letzt ist die Gesamtzahl der eingeschlossenen



Patient\*innen begrenzt. Dies liegt insbesondere am grundsätzlich selteneren Auftreten dieser speziellen Form des Bandscheibenprolaps und der insgesamt eher restriktiven Indikationsstellung bezüglich der endoskopischen Operation aufgrund der technischen Voraussetzungen. Teilweise kann die Methode aufgrund von vollständig kollabierten Bandscheibenfächern, zu engen knöchernen Neuroforamina, einer relevanten Verkalkung des Prolaps selbst oder einem versperrten Zugangsweg aufgrund hoch stehender Beckenkämme (vor allem bei LWK5/SWK1) nicht angewendet werden. Zu guter Letzt muss auch davon ausgegangen werden, dass aufgrund der subjektiven Erfahrungen des Operateurs und des Teams in verschiedenen Fällen aufgrund einer unterstellten „zu hochgradigen“ Degeneration oder unterstellten Mikroinstabilität anhand zunächst nicht verifizierter Parameter auch bereits primär zu einer alternativen Operationsmethode geraten wurde.

#### **4.5 Zusammenfassung**

Die perkutane endoskopische transforaminale Sequestrektomie von posterolateral stellt eine schnelle, sichere und mit entsprechendem Training unkomplizierte Methode der minimalinvasiven operativen Therapie bei extra- und intraforaminalen Bandscheibenvorfällen dar. In unserem Patient\*innenklientel fiel eine vergleichsweise hohe Rezidivrate auf, die zu Reoperationen und damit einer höheren sozioökonomischen, aber auch persönlichen physischen und psychischen Belastung bei dem/der Patient\*in führt. Um bereits im Vorfeld abschätzen zu können, welche Patient\*innen von dieser eigentlich vorteilhaften Operationsmethode profitieren, sollte die MRT-Bildgebung, die als Routinediagnostik im Normalfall präoperativ durchgeführt wird, dahingehend untersucht werden. Hierfür wurden verschiedene, weitgehend etablierte, Parameter für die Degeneration und Instabilität definiert, die jeweils in der Sagittal- oder Axialebene erhoben werden. Als gänzlich neuer Parameter wurde der adaptierte segmentale Cobb-Winkel eingeführt, um auch eine Fehlstellung in der Coronarebene abbilden zu können. Alle Patient\*innen, die seit Einführung der Operationsmethode in der Klinik für Neurochirurgie des BG Klinikum Bergmannstrost operiert wurden, wurden identifiziert und entsprechend der Ein- und Ausschlusskriterien gefiltert. Alle eingeschlossenen Patient\*innen erhielten

einen Fragebogen per Post und wurden ggf. noch einmal telefonisch interviewt. Das Einverständnis zur Teilnahme an der Studie vorausgesetzt, erfolgte die Gruppeneinteilung je nach Auftreten eines operationspflichtigen Rezidivbandscheibenprolaps (im selben Segment, auf der selben Seite). Nach entsprechender Untersuchung auf Gleichverteilung der bekannten Risikofaktoren für das grundsätzliche Auftreten von Bandscheibenvorfällen zwischen den Gruppen wurden nun die definierten bildmorphologischen Parameter auf ihren Zusammenhang mit dem Auftreten eines operationspflichtigen Rezidivbandscheibenprolaps hin untersucht. Hierbei konnten drei Parameter mit statistisch signifikantem Einfluss isoliert werden: die Degeneration der Bandscheibe, die Sklerosierung der Wirbelkörperabschlussplatten und der neu definierte segmentale CobbWinkel. Eine moderate Degeneration von Bandscheibe und den angrenzenden Wirbelkörpern führen zu einem signifikant erhöhten relativen Risiko, ein operationspflichtiges Rezidiv zu erleiden. Exorbitant höher ist dies bei Vorhandensein einer Knickfehlstellung im betroffenen Segment in Coronarebene in Richtung des bestehenden Prolaps.

#### **4.6 Ausblick**

Ziel weiterer, idealerweise prospektiver Studien, sollte sein, die Erkenntnisse aus dieser Arbeit anhand größerer Patient\*innenpopulationen zu reproduzieren und zu reevaluiieren. Denkbar ist hierbei, dass mit einer aussagekräftigeren Stichprobe weitere, hier zunächst nicht signifikante Parameter identifiziert werden können. Auch die Quantifizierung der jeweiligen Korrelationen (einzeln und in Kombination der Parameter) sollte in einer größeren, prospektiv erhobenen Stichprobe gelingen. Anhand dieser Daten sollte das Ziel die Ausarbeitung eines Score für die klinische Praxis zur Abschätzung der individuellen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rezidivbandscheibenprolaps sein. Ob dieser schlussendlich auch auf Patient\*innen mit medialen oder mediolateralen Bandscheibenvorfällen anwendbar ist, bliebe dann darüberhinaus zu überprüfen.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Fink W, Haidinger G. Die Häufigkeit von Gesundheitsstörungen in 10 Jahren Allgemeinpraxis. ZFA-Zeitschrift für Allgemeinmedizin. 2007;83(03):102-108.
- [2] Bauknecht M, Braun B, Müller R. GEK-Bandscheibenreport Versorgungsforschung mit GEK-Routinedaten. 2009.
- [3] Mayer H, Heider F. Der lumbale Bandscheibenvorfall. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date. 2016;11(06):427-447.
- [4] Buckwalter JA. Aging and degeneration of the human intervertebral disc. Spine. 1995;20(11):1307-1314.
- [5] Hadjipavlou A, Tzermiadianos M, Bogduk N, Zindrick M. The pathophysiology of disc degeneration: a critical review. The Journal of bone and joint surgery British volume. 2008;90(10):1261-1270.
- [6] Friedmann A, Goehre F, Ludtka C, Mendel T, Meisel H-J, Heilmann A, Schwan S. Microstructure analysis method for evaluating degenerated intervertebral disc tissue. Micron. 2017;92:51-62.
- [7] Goehre F, Ludtka C, Hamperl M, Friedmann A, Straube A, Mendel T, Heilmann A, Meisel HJ, Schwan S. Micro-computed tomography, scanning electron microscopy and energy Xray spectroscopy studies of facet joint degeneration: A comparison to clinical imaging. Micron. 2017;100:50-59.
- [8] Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. Journal of spinal disorders. 1992;5:390-390.
- [9] Siebner H, Faulhauer K. Frequency and specific surgical management of far lateral lumbar disc herniations. Acta neurochirurgica. 1990;105(3-4):124-131.

- [10] Epstein NE. Evaluation of varied surgical approaches used in the management of 170 far-lateral lumbar disc herniations: indications and results. *Journal of neurosurgery*. 1995;83(4):648-656.
- [11] Epstein N. Foraminal and far lateral lumbar disc herniations: surgical alternatives and outcome measures. *Spinal cord*. 2002;40(10):491-500.
- [12] Wiltse L, Bateman J, Hutchinson R, Nelson W. The paraspinal sacrospinalis-splitting approach to the lumbar spine 1968.
- [13] Grifka J, Witte H, Faustmann P, Heers G, Broll-Zeitvogel E. Operativer Zugang beim lumbalen Bandscheibenvorfall. *Der Orthopäde*. 1999;28(7):572.
- [14] Kirkaldy-Willis W, Farfan H. Instability of the lumbar spine. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*. 1982;165:110-123.
- [15] Leone A, Guglielmi G, Cassar-Pullicino VN, Bonomo L. Lumbar intervertebral instability: a review. *Radiology*. 2007;245(1):62-77.
- [16] Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine*. 1983;8(8):817-831.
- [17] Panjabi M, White A. *Physical Properties and Functional Biomechanics. Clinical Biomechanics of the Spine 1st ed Philadelphia: JB Lippincott Company*. 1978:1-17.
- [18] Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *Journal of spinal disorders*. 1992;5:383-383.
- [19] Pfirrmann CW, Metzdorf A, Zanetti M, Hodler J, Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine*. 2001;26(17):1873-1878.
- [20] Modic MT, Steinberg PM, Ross JS, Masaryk TJ, Carter JR. Degenerative disk disease: assessment of changes in vertebral body marrow with MR imaging. *Radiology*. 1988;166(1):193-199.
- [21] Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS, Carter JR. Imaging of degenerative disk disease. *Radiology*. 1988;168(1):177-186.

- [22] Meyerding HW. Spondylolisthesis. JBJS. 1931;13(1):39-48.
- [23] Laurent L, Osterman K. Operative treatment of spondylolisthesis in young patients. Clinical orthopaedics and related research. 1976(117):85-91.
- [24] Pathria M, Sartoris D, Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment. Radiology. 1987;164(1):227-230.
- [25] Weishaupt D, Zanetti M, Boos N, Hodler J. MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints. Skeletal radiology. 1999;28(4):215-219.
- [26] Mailleux P, Ghosez J, Bosschaert P, Malbecq S, Coulier B. Distension of the inter-facet joints in MRI: and indirect sign of an existing underestimation of spondylolisthesis and canal stenosis. Journal Belge de Radiologie. 1998;81(6):283-285.
- [27] Snoddy MC, Sielatycki JA, Sivaganesan A, Engstrom SM, McGirt MJ, Devin CJ. Can facet joint fluid on MRI and dynamic instability be a predictor of improvement in back pain following lumbar fusion for degenerative spondylolisthesis? European Spine Journal. 2016;25(8):2408-2415.
- [28] Brailsford JF. Deformities of the lumbosacral region of the spine. British Journal of Surgery. 1929;16(64):562-627.
- [29] Vanharanta H, Floyd T, Ohnmeiss DD, Hochschuler SH, Guyer RD. The relationship of facet tropism to degenerative disc disease. Spine. 1993;18(8):1000-1005.
- [30] Benditz A, Boluki D, Weber M, Zeman F, Grifka J, Voellner F, editors. Comparison of lumbar lordosis in lateral radiographs in standing position with supine MR imaging in consideration of the sacral slope. RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren; 2017: © Georg Thieme Verlag KG.
- [31] Cobb J. Outline for the study of scoliosis. Instr Course Lect AAOS. 1948;5:261-275.
- [32] Telfeian AE, Veeravagu A, Oyelese AA, Gokaslan ZL. A brief history of endoscopic spine surgery. Neurosurgical focus. 2016;40(2):E2.

- [33] Ruan W, Feng F, Liu Z, Xie J, Cai L, Ping A. Comparison of percutaneous endoscopic lumbar discectomy versus open lumbar microdiscectomy for lumbar disc herniation: a meta-analysis. *International Journal of Surgery*. 2016;31:86-92.
- [34] Cong L, Zhu Y, Tu G. A meta-analysis of endoscopic discectomy versus open discectomy for symptomatic lumbar disk herniation. *European Spine Journal*. 2016;25(1):134-143.
- [35] Zhang B, Liu S, Liu J, Yu B, Guo W, Li Y, Liu Y, Ruan W, Ning G, Feng S. Transforaminal endoscopic discectomy versus conventional microdiscectomy for lumbar disc herniation: a systematic review and meta-analysis. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2018;13(1):169.
- [36] Lübbers T. Perkutane endoskopische lumbale Diskektomie (PELD) und weitere Eingriffe an BWS und LWS mit dem SpineTIP-System. EndoPress Tuttlingen, Germany 2011. p. 6-13.
- [37] Wang H, Zhou Y, Li C, Liu J, Xiang L. Risk factors for failure of single-level percutaneous endoscopic lumbar discectomy. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2015;23(3):320-325.
- [38] Gu Y-t, Cui Z, Shao H-w, Ye Y, Gu A-q. Percutaneous transforaminal endoscopic surgery (PTES) for symptomatic lumbar disc herniation: a surgical technique, outcome, and complications in 209 consecutive cases. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2017;12(1):1-13.
- [39] Park CH, Park ES, Lee SH, Lee KK, Kwon YK, Kang MS, Lee SY, Shin YH. Risk Factors for Early Recurrence After Transforaminal Endoscopic Lumbar Disc Decompression. *Pain physician*. 2019;22(2):E133-E138.
- [40] Nellensteijn J, Ostelo R, Bartels R, Peul W, van Royen B, van Tulder M. Transforaminal endoscopic surgery for symptomatic lumbar disc herniations: a systematic review of the literature. *European Spine Journal*. 2010;19(2):181-204.
- [41] Mayer HM, Brock M. Percutaneous endoscopic lumbar discectomy (PELD). *Neurosurgical review*. 1993;16(2):115-120.

- [42] Lew SM, Mehalic TF, Fagone KL. Transforaminal percutaneous endoscopic discectomy in the treatment of far-lateral and foraminal lumbar disc herniations. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2001;94(2):216-220.
- [43] Choi G, Lee S-H, Bhanot A, Raiturker PP, Chae YS. Percutaneous endoscopic discectomy for extraforaminal lumbar disc herniations: extraforaminal targeted fragmentectomy technique using working channel endoscope. *Spine*. 2007;32(2):E93-E99.
- [44] Jang J-S, An S-H, Lee S-H. Transforaminal percutaneous endoscopic discectomy in the treatment of foraminal and extraforaminal lumbar disc herniations. *Clinical Spine Surgery*. 2006;19(5):338-343.
- [45] Lübbers T, Abuamona R, Elsharkawy AE. Percutaneous endoscopic treatment of foraminal and extraforaminal disc herniation at the L5-S1 level. *Acta neurochirurgica*. 2012;154(10):1789-1795.
- [46] Yokosuka J, Oshima Y, Kaneko T, Takano Y, Inanami H, Koga H. Advantages and disadvantages of posterolateral approach for percutaneous endoscopic lumbar discectomy. *Journal of Spine Surgery*. 2016;2(3):158.
- [47] Shepard N, Cho W. Recurrent lumbar disc herniation: a review. *Global spine journal*. 2019;9(2):202-209.
- [48] Kim M-J, Lee S-H, Jung E-S, Son B-G, Choi E-S, Shin J-H, Sung J-K, Chi Y-C. Targeted percutaneous transforaminal endoscopic discectomy in 295 patients: comparison with results of microscopic discectomy. *Surgical neurology*. 2007;68(6):623-631.
- [49] Ruetten S, Komp M, Merk H, Godolias G. Full-endoscopic interlaminar and transforaminal lumbar discectomy versus conventional microsurgical technique: a prospective, randomized, controlled study. *Spine*. 2008;33(9):931-939.
- [50] Ruetten S, Komp M, Godolias G. An extreme lateral access for the surgery of lumbar disc herniations inside the spinal canal using the full-endoscopic uniportal

transforaminal approach—technique and prospective results of 463 patients. *Spine*. 2005;30(22):2570-2578.

- [51] Sasani M, Ozer A, Oktenoglu T, Canbulat N, Sarioglu A. Percutaneous endoscopic discectomy for far lateral lumbar disc herniations: prospective study and outcome of 66 patients. *min-Minimally Invasive Neurosurgery*. 2007;50(02):91-97.
- [52] Mayer HM, Brock M. Percutaneous endoscopic discectomy: surgical technique and preliminary results compared to microsurgical discectomy. *Journal of neurosurgery*. 1993;78(2):216-225.
- [53] Suess O, Brock M, Kombos T. Motor nerve root monitoring during percutaneous transforaminal endoscopic sequestrectomy under general anesthesia for intra-and extraforaminal lumbar disc herniation. *Zentralblatt für Neurochirurgie*. 2005;66(04):190-201.
- [54] Choi K-C, Lee J-H, Kim J-S, Sabal LA, Lee S, Kim H, Lee S-H. Unsuccessful percutaneous endoscopic lumbar discectomy: a single-center experience of 10 228 cases. *Neurosurgery*. 2015;76(4):372-381.
- [55] Ziegler DS, Carreon L, Andersen MO, Jensen RK. The Association Between Preoperative MRI Findings and Surgical Revision Within Three Years After Surgery for Lumbar Disc Herniation. *Spine*. 2019;44(11):818-825.
- [56] Dora C, Schmid MR, Elfering A, Zanetti M, Hodler J, Boos N. Lumbar disk herniation: do MR imaging findings predict recurrence after surgical diskectomy? *Radiology*. 2005;235(2):562-567.
- [57] Toyone T, Takahashi K, Kitahara H, Yamagata M, Murakami M, Moriya H. Vertebral bone-marrow changes in degenerative lumbar disc disease. An MRI study of 74 patients with low back pain. *The Journal of bone and joint surgery British volume*. 1994;76(5):757-764.
- [58] Rahme R, Moussa R. The modic vertebral endplate and marrow changes: pathologic significance and relation to low back pain and segmental instability of the lumbar spine. *American Journal of Neuroradiology*. 2008;29(5):838-842.



- [59] Hasegawa K, Shimoda H, Kitahara K, Sasaki K, Homma T. What are the reliable radiological indicators of lumbar segmental instability? The Journal of bone and joint surgery British volume. 2011;93(5):650-657.
- [60] Jang SY, Kong MH, Hymanson HJ, Jin TK, Song KY, Wang JC. Radiographic parameters of segmental instability in lumbar spine using kinetic MRI. Journal of Korean Neurosurgical Society. 2009; 45: 24-31.
- [61] Schinnerer KA, Katz LD, Grauer JN. MR findings of exaggerated fluid in facet joints predicts instability. Clinical Spine Surgery. 2008;21(7):468-472.
- [62] Naeem K, Enam SA. Reading between the joints-using spinal magnetic resonance imaging for evaluation of instability. 2017.

## **Zeichnungen:**

Sarah Gundelwein

## Eidesstattliche Versicherung

Ich, Lydia Mahler, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema „Perkutane endoskopische Sequestrektomie beim foraminalen Bandscheibenprolaps - Risiken für einen Rezidivprolaps und Grenzen der Operationsmethode bei Instabilität“ / „Percutaneous endoscopic sequestrectomy of the foraminal disc herniation – risk factors for recurrence and limits of the procedure in reference to preexisting instability“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autor\*innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Erstbetreuer, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; [www.icmje.org](http://www.icmje.org)) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

## **Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.



## Publikationsliste

1. Harati A, Satopää J, Mahler L, Billon-Grand R, Elsharkawy A, Niemelä M, Hernesniemi J. Early microsurgical treatment for spinal hemangioblastomas improves outcome in patients with von Hippel-Lindau disease. *Surg Neurol Int.* 2012;3:6.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Arbeit an dieser Dissertation begleitet haben.

Zuallererst gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Hans Jörg Meisel für die Betreuung der Arbeit, insbesondere aber auch für die fortwährende Unterstützung in meiner klinischen Aus- und Weiterbildung.

Prof. Dr. med. PhD Felix Göhre danke ich für die hilfreichen Anregungen und Korrekturvorschläge.

Ich danke Philipp Schenk, Carolin Gräbsch, Yvonne Minkus und Esther Herrmann für ihren unermüdlichen Beitrag bei der Planung, Durchführung und Auswertung.

Außerordentlich dankbar bin ich meiner lieben Freundin Sarah Gundelwein für die wunderbaren Zeichnungen, die sie in vielen Stunden Arbeit erdacht, umgesetzt und perfektioniert hat. Überdies danke ich ihr für die geduldige aktive, oft aber auch einfach moralische Hilfe über die gesamte Zeit der Entstehung dieser Arbeit.

Natürlich danke ich auch meinem Vater, Andreas Mahler, der mich beim Abschluss meiner Ausbildung in vielerlei Hinsicht unterstützt hat.

für

**Dr. med. Bodo-Christian Kern**

\* 28.10.1955 † 16.12.2020