

Aus der  
Orthopädischen Universitätsklinik mit Poliklinik Tübingen

**Risikofaktoren der Anschlussdegeneration nach dorsaler  
Fusion der Wirbelsäule**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von**

**Müller, Daniel**

**2025**

Dekan:	Professor Dr. B. Pichler
1. Berichterstatter:	Privatdozent Dr. C. Walter
2. Berichterstatter:	Privatdozent Dr. S. Döbele
Tag der Disputation:	15.07.2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Anatomie</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Die Wirbelsäule.....	1
1.1.2 Wirbel und Bandscheiben .....	2
<b>1.2 Funktion der Wirbelsäule</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3 Pathologie der Wirbelsäule</b> .....	<b>6</b>
1.3.1 Degenerative Erkrankungsformen der Lendenwirbelsäule .....	8
<b>1.4 Therapeutische Ansätze</b> .....	<b>11</b>
1.4.1 Konservative Ansätze .....	11
1.4.2 Operative Ansätze .....	12
<b>1.5 Anschlussdegeneration</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6 Fragestellung und Arbeitshypothese</b> .....	<b>18</b>
<b>2. Material und Methoden</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 Das Kollektiv</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Studienablauf</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Datensammlung</b> .....	<b>21</b>
2.3.1 Auswertungsskript.....	22
2.3.2 Pfirrmann Klassifikation .....	30
2.3.3 Grading System of Mimura .....	32
<b>2.4 Statistische Auswertung</b> .....	<b>33</b>
<b>3. Ergebnisse</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1 Populationscharakteristika</b> .....	<b>34</b>

<b>3.2</b>	<b>Radiologische Ergebnisse.....</b>	<b>39</b>
3.2.1	Lumbale Lordose .....	39
3.2.2	Pelvic Tilt.....	40
3.2.3	Pelvic Incidence .....	40
<b>3.3</b>	<b>Operative Parameter .....</b>	<b>40</b>
3.3.1	Fusionslänge.....	40
3.3.2	Inklusion von L5/S1.....	42
<b>3.4</b>	<b>Überlebenszeit bis zur Anschlussdegeneration.....</b>	<b>44</b>
<b>3.5</b>	<b>Ergebnisüberblick .....</b>	<b>49</b>
<b>4.</b>	<b><i>Diskussion.....</i></b>	<b>51</b>
4.1	Demographische Faktoren .....	51
4.2	Radiologische Faktoren .....	53
4.3	Operative Faktoren .....	55
4.4	Limitationen .....	59
4.5	Schlussfolgerung .....	60
<b>5.</b>	<b><i>Zusammenfassung.....</i></b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b><i>Literaturverzeichnis.....</i></b>	<b>64</b>
<b>7.</b>	<b><i>Erklärung zum Eigenanteil.....</i></b>	<b>73</b>
<b>8.</b>	<b><i>Veröffentlichung von Studienergebnissen .....</i></b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b><i>Danksagung .....</i></b>	<b>75</b>

# Abkürzungsverzeichnis

ASD = Anschlussdegeneration

BMI = Body-Mass-Index

BWS = Brustwirbelsäule

cm = Zentimeter

HWS = Halswirbelsäule

LWS = Lendenwirbelsäule

L1-5 = Lendenwirbel 1-5

LL = Lumbale Lordose

mm = Millimeter

PI = Pelvic Incidence

S1 = Sakralwirbel 1

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:Anatomie der Wirbelsäule von ventral (a), dorsal (b) und links lateral (c) (Schulte et al., 2018).....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Wirbels (Schulte et al., 2018) ....	3
Abbildung 3: Aufbau eines Discus intervertebralis (Schulte et al., 2018) .....	4
Abbildung 4: Bandscheibenvorfall im Bereich der LWS, radiologisch (a) und schematisch (b) (Schulte et al., 2018) .....	9
Abbildung 5: Radiologische Darstellungen des Entwicklungsverlaufes von Anschlussdegenerationen (Nakajima et al., 2024) .....	16
Abbildung 6: Lumbar Lordotic Angle.....	22
Abbildung 7: L1 Plumb Line .....	23
Abbildung 8: Slope Angle Endplate .....	24
Abbildung 9: Adjacent Disc Angle Caudal, Adjacent Disc Height Caudal.....	25
Abbildung 10: Adjacent Disc Angle Cranial, Adjacent Disc Height Cranial.....	26
Abbildung 11: Pelvic Tilt.....	27
Abbildung 12: Pelvic Incidence .....	28
Abbildung 13: Schematische Darstellung der radiologischen Lendenwirbelsäulenparameter (Walter et al., 2021).....	29
Abbildung 14: Bewertungssystem zur Beurteilung der lumbalen Bandscheibendegeneration A-E (Grad I-V) (Pfirrmann et al., 2001) .....	31
Abbildung 15: Grading System of Mimura (Mimura et al., 1994) .....	32
Abbildung 16: Geschlechterverteilung .....	34
Abbildung 17: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	35
Abbildung 18: Altersverteilung .....	36
Abbildung 19: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Alter .....	37
Abbildung 20: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom BMI .....	39
Abbildung 21: Fusionslänge.....	41
Abbildung 22: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Fusionslänge .....	42
Abbildung 23: Inklusion von S1.....	43
Abbildung 24: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Inklusion von S1 .....	44
Abbildung 25: Überlebenskurve in Bezug auf die Gesamtkohorte .....	45
Abbildung 26: Überlebenskurve in Abhängigkeit der Differenz PI-LL .....	46

Abbildung 27: Überlebenszeit in Korrelation zur lumbalen Lordose .....	47
Abbildung 28: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur ‚Pelvic Incidence‘ .....	48
Abbildung 29: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Inklusion von S1 .....	49

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Alter .....	37
Tabelle 2: BMI.....	38
Tabelle 3: Einfluss klinischer Parameter auf die Überlebenszeit.....	46

# 1. Einleitung

## 1.1 Anatomie

### 1.1.1 Die Wirbelsäule

Die Wirbelsäule (Columna vertebralis) ist eine knöcherne Struktur, bestehend aus Wirbelbögen und Wirbelkörpern, die sich über den gesamten Rücken erstreckt und das zentral tragende Element im menschlichen Skelett darstellt. Nur durch die Wirbelsäule ist der aufrechte Gang des Menschen bei gleichzeitiger Stabilität und Beweglichkeit möglich (Aumüller et al., 2020). Im Inneren der Wirbelsäule verläuft der Wirbel- bzw. Spinalkanal (Canalis vertebralis), welcher den knöchernen Schutz für das darin verlaufende empfindliche Rückenmark bietet. Die Wirbelsäule besteht aus 24 Wirbeln, welche über 23 Synchronosen miteinander verbunden sind, und kann grundsätzlich in 5 Abschnitte unterteilt werden. Man unterscheidet die Halswirbelsäule (HWS), von der Brustwirbelsäule (BWS), der Lendenwirbelsäule (LWS), dem Kreuzbein (Os sacrum) und dem Steißbein (Os coccygis) (ebd.).

Die Halswirbelsäule besteht aus 7 Wirbeln, die als C1-CVII bezeichnet werden. Die Brustwirbelsäule ist aus 12 Wirbeln (Th1-ThXII), die Lendenwirbelsäule aus 5 Wirbeln (L1-LV), ebenso wie das Kreuzbein (S1-SV) und das Steißbein aus 3-5 Wirbeln (CoI-CoV) aufgebaut (Schünke et al., 2011). Von sagittal betrachtet, weist die Wirbelsäule eine Doppel-S-Form auf, welche durch 4 aufeinanderfolgende Krümmungen zustande kommt. Als Lordosen werden nach ventral und als Kyphosen nach dorsal konvexe Krümmungen bezeichnet. Die Wirbelsäule weist kranial eine Zervikallordose auf. Nach kaudal verlaufend folgen die Thorakalkyphose, die Lumballordose und die Sakralkyphose (Aumüller et al., 2020). Als Stabilisator der Wirbelsäule dienen verschiedene Bänder, welche sich zwischen benachbarten Wirbeln oder auch über größere Abschnitte erstrecken können. Abbildung 1 zeigt schematisch den anatomischen Aufbau der Wirbelsäule von ventral (a), dorsal (b) und von links lateral (c):

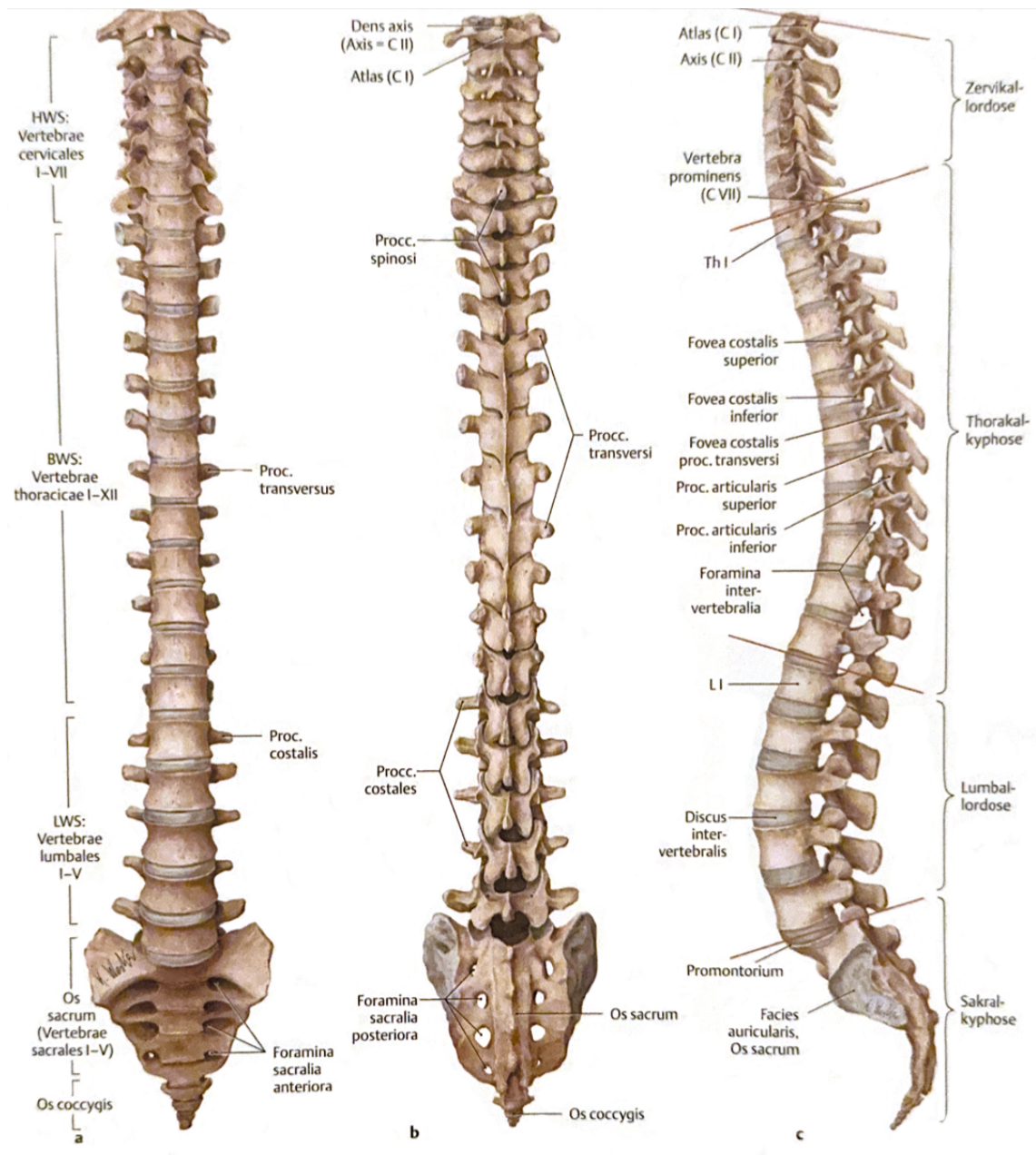


Abbildung 1: Anatomie der Wirbelsäule von ventral (a), dorsal (b) und links lateral (c) (Schulte et al., 2018)

## 1.1.2 Wirbel und Bandscheiben

Alle Wirbel, mit Ausnahme des 1. und 2. Halswirbels und des Sakrums, sind einheitlich aufgebaut. Im Aufbau eines Wirbels unterscheidet man den Wirbelkörper (Corpus vertebrae), von dem Wirbelbogen (Arcus vertebrae), dem Dornfortsatz (Proc. spinosus), von zwei Querfortsätzen (Procc. transversi/costales bei Lendenwirbeln) und den vier Gelenkfortsätzen (Procc. articulares)

(Schünke et al., 2020). Die Aufgabe der Wirbelkörper ist es, die entstehende Last der oberen Körperabschnitte über den Beckenring auf die Beine zu verteilen. Von kranial nach kaudal nimmt die Größe der Wirbelkörper, entsprechend der ansteigenden Last, zu (Aumüller et al., 2020). In Abbildung 2 ist der Aufbau eines Wirbels schematisch dargestellt:

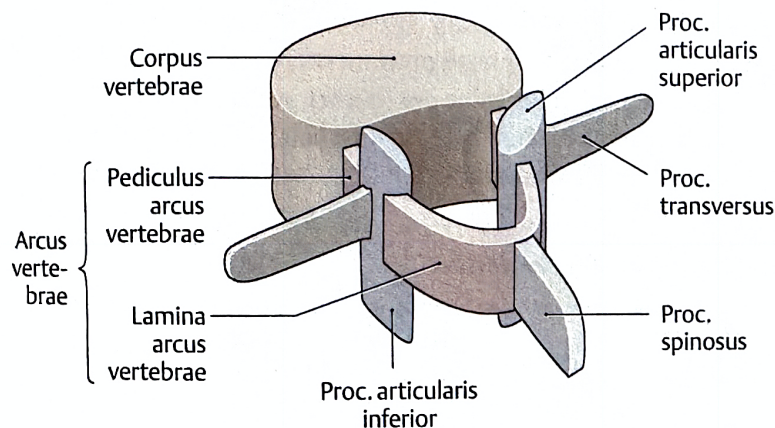
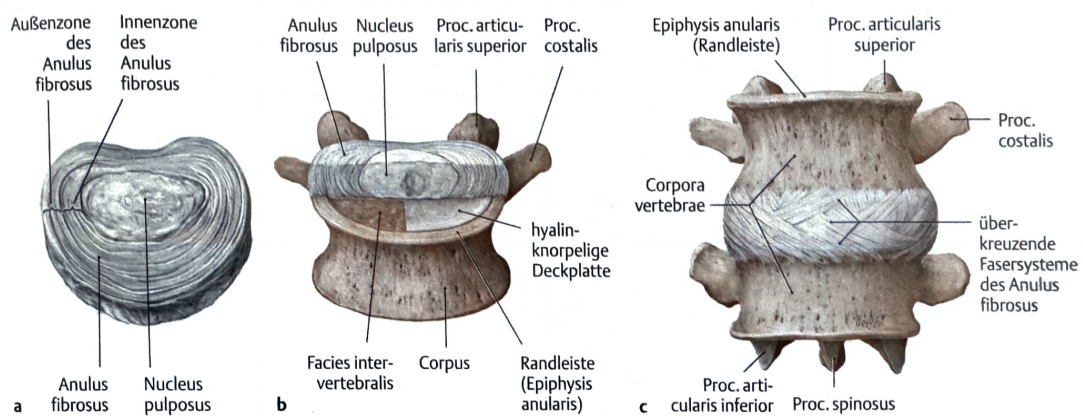


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Wirbels (Schulte et al., 2018)

Insgesamt sitzen zwischen den Wirbelkörpern 23 Bandscheiben (Disci intervertebrales). Diese sind mit den knorpeligen Deckplatten und der knöchernen Randleiste der Wirbelkörper verbunden. Zwischen den ersten beiden Halswirbeln befinden sich keine Bandscheiben. Diese sind durch echte Gelenke (Diarthrosen) miteinander verbunden. Im Inneren einer Bandscheibe befindet sich ein Gallertkern (Nucleus pulposus), der von einem äußeren Faserring (Anulus fibrosus) ummantelt wird (Netter, 2001). Der Anulus fibrosus besteht aus Faserknorpel, welcher in konzentrisch geschichteten Lamellen angeordnet ist. Zwischen Anulus fibrosus und Gallertkern besteht keine scharfe Grenze. Die inneren Lamellen des Anulus fibrosus gehen in die Gallerte des Nucleus pulposus über. Die Gallerte besteht zum größten Teil aus Glykosaminoglykanen, welche ein hohes Wasserbindungsvermögen aufweisen. Die Bandscheibe dient der Stoßdämpfung der Wirbelsäule. Durch den hohen Wasseranteil fungiert sie als Wasserkissen und verteilt so den auf ihr lastenden Druck gleichmäßig auf die benachbarten Wirbelkörperdeckplatten (Aumüller et al., 2020). Durch die Fasern des Anulus fibrosus werden die Bewegungen

zwischen den benachbarten Wirbelkörpern begrenzt. Der Gallertkern wird bei Kippbewegungen der Wirbelsäule auf die Gegenseite verlagert. Somit ist bei intaktem Diskus ein Wirbelgleiten (Verschieben der Wirbel gegeneinander) nicht möglich (ebd.). Die Bandscheiben werden im Laufe des Tages bei aufrechter Körperhaltung immer flacher zusammen gedrückt und verlieren aus diesem Grund an Wasser. Dadurch werden die einzelnen Bandscheiben um etwa 1 Millimeter (mm) abgeflacht und die gesamte Körpergröße eines Menschen kann am Abend um 1-3 Zentimeter (cm) kleiner sein als noch am Morgen (Brock, 2007). Während der nächtlichen Ruhephase regenerieren sich die entlasteten Bandscheiben durch eine Rehydrierung des Nucleus pulposus. Dieser beschriebene Ein- und Ausstrom von Extrazellulärflüssigkeit ist von großer Bedeutung für die Ernährung des Discus, da sich nur in den äußersten Schichten des Faserrings Blutgefäße befinden (Aumüller et al., 2020). Abbildung 3 beschreibt den Aufbau des Discus intervertebralis von kranial-ventral (a,b) und von ventral (c):



(Prometheus LernAtlas, Thieme, 3. Aufl.)

a Ansicht von kranial-ventral.

b Ansicht auch von kranial-ventral, wobei die vordere Bandscheibenhälfte und die rechte Hälfte der Deckplatte entfernt wurde.

c Ansicht von ventral.

Abbildung 3: Aufbau eines Discus intervertebralis (Schulte et al., 2018)

## 1.2 Funktion der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule ist in der Regel funktionell aus 25 Bewegungssegmenten aufgebaut. Zu einem Bewegungssegment gehören zwei benachbarte Wirbel mit der dazwischen gelegenen Bandscheibe, die Wirbelbogengelenke, die sie verbindenden Muskeln und Bänder sowie das Rückenmark und der entsprechende Spinalnerv (Aumüller et al., 2020). Die Wirbelkörperdeckplatten, mit dem dazwischen gelegenen Discus sowie die beiden Wirbelbogengelenke in einem Bewegungssegment, dienen der Lastübertragung. Grundsätzlich sind in einem Bewegungssegment Bewegungen in 3 Achsen möglich. Diese sind die Ventralflexion/Dorsalextension, die Lateralflexion und die Rotation. Ein einzelnes Bewegungssegment für sich ermöglicht nur eine Bewegung von wenigen Graden (ebd.). In Summe betrachtet ergibt die Gesamtmobilität der Wirbelsäule die folgenden Werte (Niethard & Pfeil, 2005):

- Flexion – Extension 245°
- Rotation 210°
- Lateralflexion 160°

Diese Werte werden allerdings nur von noch jungen und beweglichen Personen erreicht und können mit zunehmendem Alter stark abweichen (ebd.).

Die Rückenmuskulatur gehört zu den kräftigsten Muskeln des menschlichen Körpers. Sie setzt an den Wirbelbögen sowie an den Dorn- und Querfortsätzen der Wirbelkörper an und ist für die Bewegung des Rumpfes von großer Bedeutung (Aumüller et al., 2020). Darüber hinaus spielen besonders die kleinen, tiefen, unisegmentalen Muskeln eine essenzielle Rolle bei der dauerhaften Stabilisierung der Wirbelsäule. In Summe stellt die Rückenmuskulatur ein aktives Verspannungssystem dar, welches sich vom Kopf bis zum Beckengürtel erstreckt (ebd.). Dabei unterscheidet man die autochthone tiefe Rückenmuskulatur von den autochthonen oberflächlichen Muskeln. Neben den 3 vorrangigen Aufgaben der Wirbelsäule, der Halte- und Stützfunktion, der Ausgleichsfunktion gegenüber Schwerkraft und der Schutzfunktion für das darin verlaufende Rückenmark, hat die Wirbelsäule erheblichen Einfluss auf das

äußere Erscheinungsbild sowie dem damit verbundenen psychischen Zustand eines Menschen (Rössler & Rüther, 2005). Des Weiteren beeinflusst sie die Atmung sowie das Zusammenspiel der Muskulatur von Rücken, Gesäß, Bauch und Brust (ebd.).

### 1.3 Pathologie der Wirbelsäule

Laut einer Studie des Robert Koch Instituts aus dem Jahr 2021 haben 61,3% der Deutschen im vergangenen Jahr mindestens einmal Rückenschmerzen gehabt (von der Lippe et al., 2021). Sowohl Männer als auch Frauen zeigen eine lineare Zunahme der Häufigkeit chronischer Rückenschmerzen, wobei auffällig ist, dass Frauen mit einer Prävalenz von 66,0% deutlich häufiger betroffen sind als Männer mit 56,4% (ebd.). Im Volksmund unterscheidet man die Nackenschmerzen von den Kreuzschmerzen (unterer Teil vom Rücken). Aus medizinischer Sicht werden die Dorsalgien von den etwa doppelt so häufig auftretenden Lumbalgien unterschieden (von der Lippe et al., 2021; Casser, 2016). Während sich Dorsalgien als chronischer Schmerz vor allem im Bereich von Brustkorb, Schultern, Hals und Armen darstellen, bezeichnet man als Lumbalgien Schmerzen in der Lenden- oder Kreuzbeinregion. Lumbalgien treten in jeglichen Ländern, Alters- und Einkommensgruppen auf, zählen mittlerweile zu den Volkskrankheiten und stellen ein großes volkswirtschaftliches Problem dar (Hartvigsen et al., 2018; Bischoff, 2005). Weltweit ist die Lebensdauer in Jahren, in welchen Patienten unter Einschränkungen aufgrund von Rückenschmerzen leiden, von 1990 bis 2015 um 54,0% gestiegen (ebd.). Gründe hierfür sind vor allem das Bevölkerungswachstum sowie die immer weiter steigende Lebenserwartung der Bevölkerung (Destatis, 2024).

Die häufigsten Ursachen für Rückenschmerzen allgemein sind Fehlbelastungen mit einhergehenden Schädigungen oder Erkrankungen der Wirbelsäule. Diese können Knochen, Bindegewebe, Muskeln oder auch Nerven betreffen und sind nachstehend aufgelistet (Chenot, 2009):

- Neoplasien der Wirbelsäule
- Traumata und Verletzungen
- Entzündliche Erkrankungen
- Fehlentwicklungen bzw. Fehlanlagen
- Formveränderungen und funktionelle Störungen bedingt durch degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule

Im Folgenden soll ausschließlich auf die degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule eingegangen werden, da diese im Fokus dieser Untersuchung stehen. Als degenerative Erkrankung bezeichnet man Veränderungen eines Gewebes, Organs oder einer Zelle in Funktion und Morphologie, bedingt durch Verschleiß, Abnutzung, Alterung oder eine lang einwirkende Schädigung (Scharla, 2001).

Degenerative Veränderungen der Bandscheibe und des Bewegungssegments können zu Einengungen und Verlagerungen von neuronalen Strukturen führen und sich in Schmerzen, Sensibilitätsstörungen oder sogar Lähmungen äußern (Reith et al., 2014). Der mit 90% häufigste Grund für Lumbalgien und Lumboischialgien sind degenerative Veränderungen an der Zwischenwirbelscheibe, welche man in der Regel schon im 3. Lebensjahrzehnt nachweisen kann (Hackenbroch, 1996). Die Schmerzsymptome können durch pathologische Kontakte der Bandscheibe am hinteren Längsband, durch Irritation der Nervenwurzel aufgrund eines einwirkenden Drucks, durch eine Kapseldehnung oder Arthrose im Wirbelgelenk verursacht werden (Scheuer, 2018). Demnach kann laut Scheuer (2018) zwischen den folgenden Schmerzsyndromen unterschieden werden:

- Lumbalsyndrom
- Lumbales Wurzelsyndrom (radikuläres Schmerzsyndrom)
- Facettengelenkssyndrom (pseudoradikuläres Syndrom)

Klinisch kommt es häufig zu einer Kombination der Schmerzbilder, wodurch die Behandlungsstrategie erschwert wird (Hackenbroch, 1996). Das radikuläre und das pseudoradikuläre Schmerzsyndrom lassen sich in der Praxis nur schwer

unterscheiden. Typisch hierfür sind diffuse, in die Extremitäten ausstrahlende Schmerzen. Darüber hinaus klagen die betroffenen Patienten häufig über Hyp- bzw. Parästhesien (Scheuer, 2018).

### 1.3.1 Degenerative Erkrankungsformen der Lendenwirbelsäule

Es gibt viele verschiedene degenerative Erkrankungsformen der Lendenwirbelsäule, welche oft bereits im frühen Erwachsenenalter auftreten und sowohl einen symptomatischen, als auch einen asymptomatischen Verlauf nehmen können (Baur-Melnyk et al., 2006). Diese degenerativen Veränderungen können zum einen von äußeren Faktoren, wie schwerer körperlicher Belastung, aber auch durch genetische Veranlagungen beeinflusst sein (Reith et al., 2014). Das Myelon kann durch degenerative Veränderungen der Bandscheiben und Bewegungssegmente stark geschädigt werden. Man unterscheidet zwischen Bandscheibenvorfällen, Wirbelkanaleinengungen (Stenosen), Instabilitäten (Spondylolisthese; Spondylolyse), Skoliose, Spondylarthrose und der am häufigsten auftretenden Wirbelsäulenerkrankung, der Osteochondrose (de Sèze et al., 1970).

Bei dem lumbalen Bandscheibenvorfall kommt es zu einer Verlagerung des Bandscheibengewebes nach lateral oder dorsal. Dies ist zumeist verbunden mit starken Kreuzschmerzen, Schmerzausstrahlung bis in das Bein sowie neurologischen Ausfallerscheinungen durch Kompression von nervalen Strukturen (Richter et al., 2016). Abbildung 4 verdeutlicht die Pathologie des Bandscheibenvorfalls schematisch:

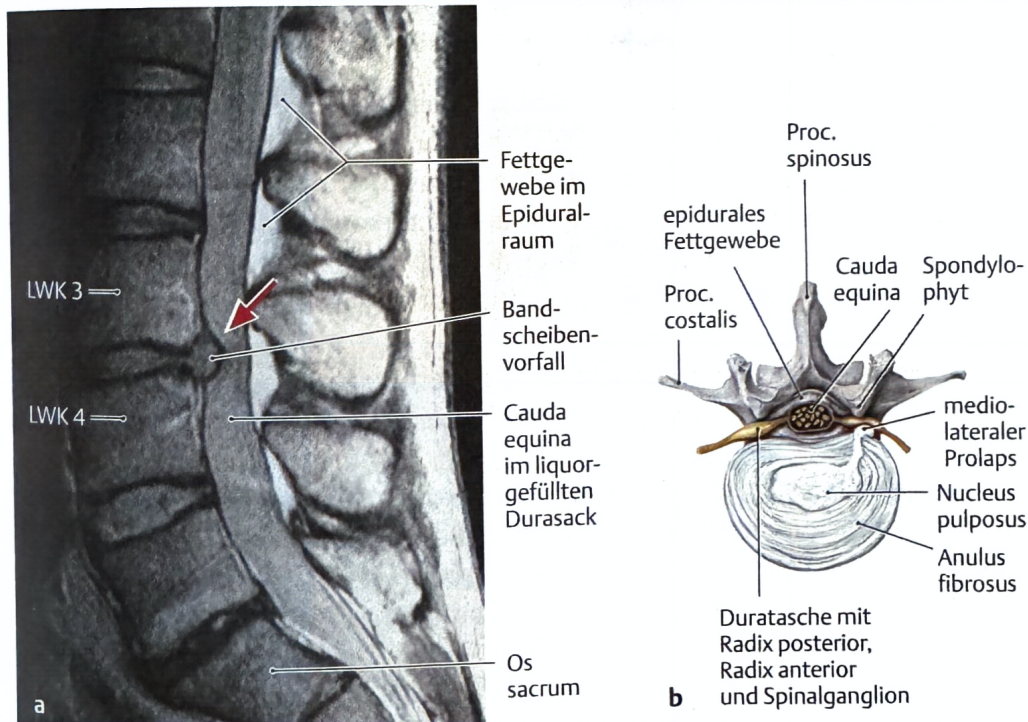


Abbildung 4: Bandscheibenvorfall im Bereich der LWS, radiologisch (a) und schematisch (b) (Schulte et al., 2018)

Erst in den letzten Jahrzehnten ist die lumbale Spinalstenose zu einem greifbaren Krankheitsbild geworden (Putz, 2004). Es kommt zu einem Missverhältnis zwischen bestehendem Raumangebot innerhalb des Spinalkanals und Platzbedarf des Myelon (ebd.), wodurch es zu einer Kompression von einer oder mehrerer Nervenwurzeln kommen kann. Diese Stenosen treten vor allem in der unteren Lendenwirbelsäule, im Bereich der Lendenwirbel 3 und 4 (L3/L4) und 4 und 5 (L4/L5), auf (Tomkins-Lane et al., 2014). Zudem können sie zentral oder lateral auftreten, angeboren oder erworben sein oder in Kombination auftreten (Gitter & Kretschmer, 1996). Die Einengung des lumbalen Spinalkanals kann asymptomatisch verlaufen, potenziell jedoch auch zu einer Irritation oder zu einer schwerwiegenden Schädigung der Cauda equina führen (Vogel, 1984). Infolgedessen kann es zu einer Schmerzsymptomatik, Gefühlsstörungen, Krämpfen und Kontrollverlust über die Muskulatur kommen (Thomé et al., 2008).

Als Spondylolyse bezeichnet man eine Spaltbildung im Bereich der Interartikularportion des Wirbelbogens (Wittenberg et al., 1998). Laut Wittenberg

et al. (1998) kommt sie bei 4,5% der Kinder im Alter von bis zu 6 Jahren und bei 6,0% der Erwachsenen vor. Vor allem bei sportlich aktiven Menschen mit wiederholter Lordosierung der Lendenwirbelsäule ist die Rate mit 50,0% beachtlich (ebd.). Auf eine Spondylolyse folgend kann sich ein Wirbelgleiten nach ventral entwickeln, welches Spondylolisthese genannt wird. Spondylolysen sowie Spondylolisthesen können asymptomatisch verlaufen, jedoch auch belastungs- und bewegungsabhängige Rückenschmerzen, sowie bei einem sehr hohen Grad des Gleitwirbels, neurologische Symptome verursachen (Storzer et al., 2020). Als Sonderform ist die Spondyloptose zu nennen, bei der es zu einem Verlust der Kontaktfläche der Wirbelkörpersegmente untereinander kommt (ebd.).

Meyerding (1932) verfasst die folgenden Stadien der Spondylolisthese:

- I. Versatz der Wirbelkörper bis 25%
- II. Versatz der Wirbelkörper von 25-50%
- III. Versatz der Wirbelkörper von 50-75%
- IV. Versatz der Wirbelkörper >75%

Unter einer Skoliose versteht man die von frontal betrachtete, dauerhafte seitliche Krümmung der Wirbelsäule. Man unterscheidet die idiopathische Skoliose, welche mit 80,0% am häufigsten vorkommt, von der neurogenen, der kongenitalen sowie der adulten Form der Skoliose (Radl et al., 2011). Im Vergleich zu den 3 anderen Formen, bereitet die idiopathische Form zu Beginn in der Regel nur ästhetische, symptomlose Einschränkungen. Die anderen 3 Formen der Skoliose bereiten jedoch durch sekundäre Veränderungen vor allem Rückenschmerzen (ebd.).

Bei der Spondylarthrose handelt es sich um einen Gelenkverschleiß in der Wirbelsäule. Dabei werden die kleinen Facettengelenke alters- und belastungsbedingt abgenutzt und verlieren dadurch ihre ursprüngliche Form (Fabricius, 2021). Starken Einfluss auf den Verschleiß haben insbesondere sportliche Aktivitäten, schwere körperliche Belastungen sowie Übergewicht. Die Spondylarthrose tritt vor allem im Bereich der Lendenwirbelsäule auf und kann Schmerzen im betroffenen Bereich, sowohl in Ruhe als auch in Bewegung, sowie

eine Schmerzausstrahlung bis in die Beine verursachen (Heipertz & Schmitt, 1978).

Unter einer Osteochondrose versteht man eine verschleißbedingte, degenerative Veränderung, bei der sowohl Knochen als auch Knorpel betroffen sind (Knetsch, 1967). Bei der Erkrankung sind zunächst die Bandscheiben betroffen, woraufhin die Veränderungen im weiteren Verlauf auf die Wirbelkörper übergehen. Es kommt zu einer Erniedrigung der Bandscheiben, zu einer Sklerosierung der Deckplatten und zu Osteophytenbildung (ebd.). Die Ätiologie ist bislang weitestgehend ungeklärt (Achar & Yamanaka, 2019). Eine Osteochondrose im Bereich der Wirbelsäule kann typischerweise Symptome wie belastungs- und bewegungsabhängige Rückenschmerzen, Ausstrahlungsschmerzen bis in die Beine und Taubheits- sowie Lähmungserscheinungen, hervorrufen (Birnberger & Burg, 1978).

## 1.4 Therapeutische Ansätze

Um chronische Rückenschmerzen, hervorgerufen durch degenerative Veränderungen der Wirbelsäule, erfolgreich therapieren zu können, ist zunächst eine gezielte und fundierte Diagnostik und Indikationsstellung notwendig (Heider & Siepe 2016). Aufgrund der immer älter werdenden Gesellschaft stellen die degenerativen Veränderungen eine zunehmende Herausforderung für den Behandler dar (Weckbach et al., 2017).

### 1.4.1 Konservative Ansätze

Etwa 80% der Patienten können durch eine rein konservative Therapie erfolgreich behandelt werden (Heider & Siepe, 2016). Mögliche Behandlungsoptionen stellen die medikamentöse, die physikalische sowie die Infiltrationstherapie, dar (Bischoff, 2005). Die medikamentöse Behandlung soll den Patienten helfen, die aktuell eingeschränkten alltäglichen Aktivitäten schmerzfrei wieder aufnehmen zu können. Zu den gängigen verschriebenen Medikamentengruppen zählen opioide und nicht-opioide Analgetika sowie Antidepressiva (Kocak et al., 2017). Bei der physikalischen Therapie werden

Reize in Form von Wärme, Kälte, Bewegung, Druck oder auch Elektrizität an der betroffenen Stelle ausgeübt, um eine Körperreaktion im Sinne einer kurz- oder langfristigen Linderung der Schmerzen zu erzielen (Sturm et al., 2019). Die Infiltrationstherapie beinhaltet vor allem wirbelsäulennahe Injektionen von Spinalnervanalgesien in Kombination mit einem physiotherapeutischen Programm (Krämer et al., 2012). Darüber hinaus ist eine Ernährungsumstellung und vermehrte Bewegung zur Gewichtsreduktion (Fritsch, 2003), sowie Rückenschule mit Haltungs- und Verhaltenstraining zur Vermeidung von Rückenschäden (Tertiärprävention) angeraten (Wiese et al., 2009).

Sollte es zu bleibenden neurologischen Defiziten oder einem Versagen des konservativen Verfahrens kommen, ist eine operative Therapie indiziert (Heider & Siepe, 2016). Diese kann jedoch kurz- oder langfristig mit schwerwiegenden Komplikationen einhergehen (Weckbach et al., 2017), worauf im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingegangen werden soll.

#### 1.4.2 Operative Ansätze

Sofern die konservative Therapie langfristig nicht oder nicht mehr den gewünschten Erfolg erzielt, gibt es final die Möglichkeit operative Behandlungsmethoden einzuleiten. Progrediente Paresen, das Konus-Kauda-Syndrom und Miktionsstörungen stellen dem gegenüber eine sofortige absolute Operationsindikation dar (Bischoff, 2005).

Grundsätzlich wird bei der operativen Therapie versucht, die Instabilität des betroffenen Wirbelsäulenabschnitts wieder zu festigen, die entstandene nervale Kompression zu entlasten und geeignete Platzverhältnisse zu schaffen. Dabei stehen sich bewegungserhaltende und fusionierende Ansätze gegenüber (Weckbach et al., 2017). Bewegungserhaltende, operative Ansätze stellen jedoch nur in wenigen Situationen eine alleinige Behandlungsoption dar. Hierzu zählt beispielsweise die Dekompression (heute meist unilaterale Laminotomie mit Dekompression über den Horizont) in Folge einer Spinalkanalstenose (Drumm et al., 2010).

Um das Fortschreiten einer lumbalen Degeneration und eine daraus resultierende hochgradige Instabilität der Lendenwirbelsäule zu verhindern, gilt die Therapie der segmentalen Fusion (Spondylodese) seit mehreren Jahrzehnten als Goldstandard (Werner et al., 2014). Die Versteifungsoperation stellt sich nach wie vor als gutes und nachhaltiges Verfahren zur Schmerzreduktion bei gleichzeitig erhaltener Belastbarkeit der Wirbelsäule dar, auch wenn ein Großteil der Mobilität verloren geht. Die Anfänge der Spondylodese gehen in das späte 19. Jahrhundert zurück (Feldmann & Wittenberg, 2001). Sie beschreibt eine operative Technik, bei der mehrere, benachbarte Wirbelkörper durch Einbringung von Pedikelschrauben durch die Bogenwurzeln, mit optionaler Verwendung von interkorporellen Cages und anschließender Verblockung durch Titanstangen, miteinander fusioniert und immobilisiert werden (ebd.).

Das Ziel der Operation ist es, den entsprechenden Wirbelsäulenabschnitt bestmöglich zu rekonstruieren und eine dauerhaft biomechanische Fusion zu erreichen, um die Nervenstrukturen zu entlasten (Schnake et al., 2019). Durch die operative Immobilisation des betroffenen Abschnitts verknöchern die Bandscheiben mit zunehmender Zeit und stellen so die benötigte Stabilität der Wirbelsäule sicher. Um die Instrumentation mit Pedikelschrauben und Titanstangen zu entlasten und den Prozess der Verknöcherung zu beschleunigen, gibt es die Möglichkeit der Ausräumung des Bandscheibenfaches mit anschließender Einbringung von interkorporellen Cages als Platzhalter (Freiherr von Salis-Soglio et al., 2005). Diese stabilisieren den Abstand zwischen zwei Wirbeln und verhindern schlussfolgernd eine neuroforaminale Kompression durch Höhenverlust im Bandscheibenfach (ebd.). Interkorporelle Cages bestehen aus metallischen (Titan) oder kunststoffbasierten (Polyetheretherketon (PEEK)) Materialien und zeigen überwiegend hohe knöcherne Fusionsraten von mehr als 90% (ebd.).

Die heute verwendeten Operationstechniken der Spondylodese unterscheiden sich vor allem in der Art des Zugangs (Weckbach et al., 2017). Man unterscheidet zwischen einem anteriorem (ALIF – Anterior Lumbar Interbody

Fusion), posteriorem (PLIF – Posterior Lumbar Interbody Fusion; TLIF – Transforaminal Lumbar Interbody Fusion) und lateralem Zugang (LLIF – Lateral Lumbar Interbody Fusion; XLIF – Extreme Lateral Interbody Fusion; OLIF – Oblique Lumbar Interbody Fusion) (ebd.).

Grundsätzlich sollen durch die Operation Schmerzen, welche durch Bewegung im betroffenen Segment ausgelöst werden, verhindert werden.

## 1.5 Anschlussdegeneration

Neben generellen Risiken welche mit einer Operation einher gehen, wie Infektionen, Wundheilungsstörungen oder Verletzungen von Nachbarstrukturen, lässt sich nach einer dorsalen Fusion der Wirbelsäule vermehrt eine Anschlussdegeneration (ASD) beobachten. Als Anschlussdegeneration bezeichnet man degenerative Veränderungen an den beweglichen Segmenten, die ober- oder unterhalb an ein fusioniertes Wirbelsäulensegment angrenzen. Vor allem im cranialen Anschlusssegment der Fusion werden die zuvor angesprochenen Degenerationen beobachtet (Werner et al., 2014). Die Anschlussdegeneration tritt, einhergehend mit der Zunahme der durchgeführten Fusionsoperationen, in den letzten Jahren immer häufiger auf (Saavedra-Pozo et al., 2014). Nach einer durchgeführten Fusionsoperation liegt die Prävalenz einer Anschlussdegeneration im Bereich der Lendenwirbelsäule bei 26,6% pro Jahr (Bredow et al., 2022). Die degenerativen Veränderungen der Anschlusssegmente sind in den meisten Fällen klinisch unauffällig. In 8,5% der Fälle handelt es sich jedoch um eine symptomatische Anschlussdegeneration (ebd.).

Die Gründe und Risikofaktoren für das Auftreten einer Anschlussdegeneration sind multifaktoriell und sollen in der vorliegenden Studie untersucht werden. Bisherige Studien kamen zu dem Ergebnis, dass es aufgrund der Fusion zu einer Veränderung der biomechanischen Belastung im Bereich der angrenzenden Segmente kommt (Rao et al., 2005; Umehara et al., 2000). Folgend kommt es in den benachbarten Segmenten zu einer Hypermobilität, was zu einer intradiskalen

Drucksteigerung und einer erhöhten Belastung der Facettengelenke führt (ebd.). Darüber hinaus zählen zu den bereits bekannten potentiellen Risikofaktoren für das Auftreten einer Anschlussdegeneration das Alter des Patienten, die zuvor bestehende Degeneration und ihr Ausmaß sowie die Instrumentierung selbst, die Länge der Fusionsstrecke, mögliche Facettengelenksverletzungen, welche beim Setzen der Pedikelschrauben entstehen können, und das sagittale Malalignment respektive die sagittale Imbalance (Werner et al., 2014).

In Abbildung 5 ist der zeitlich schnell voranschreitende Entwicklungsverlauf einer Anschlussdegeneration im Bereich der Lendenwirbelsäule anhand von Röntgen- und MRT-Bildern dargestellt (Nakajima et al., 2024). Nakajima et al. (2024) untersuchten in einer retrospektiven Studie mit 170 Patienten Risikofaktoren für eine schnell einsetzende Anschlussdegeneration kranial der Fusion. Patientenfall A zeigt degenerative Veränderungen in den Anschlusssegmenten bereits nach 6 Monaten nach Initialeingriff und bei Patient B lässt sich eine Anschlussdegeneration erst nach 2 Jahren röntgenologisch feststellen (ebd.).

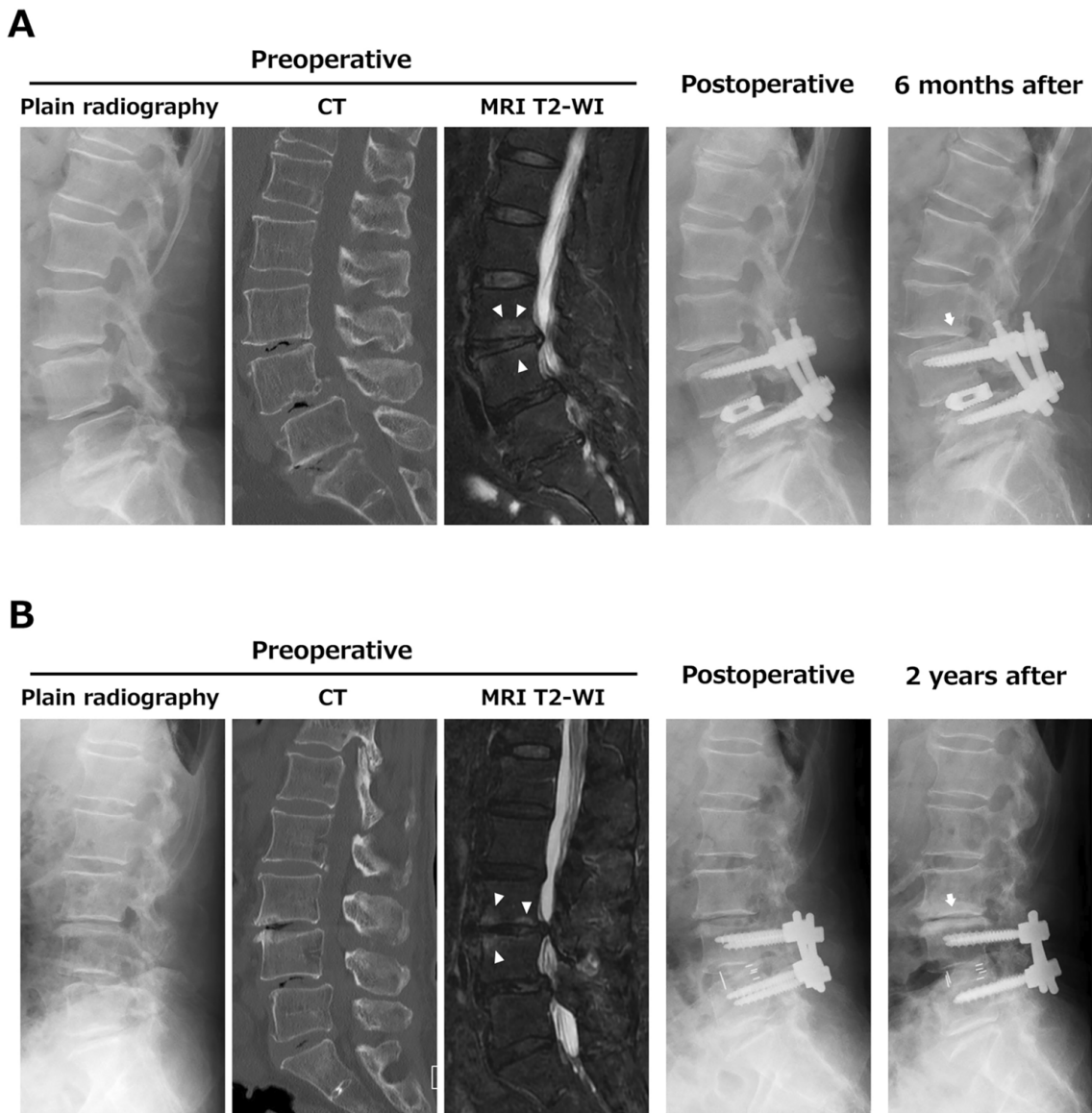


Abbildung 5: Radiologische Darstellungen des Entwicklungsverlaufes von Anschlussdegenerationen (Nakajima et al., 2024)

Das sagittale Wirbelsäulenprofil ist sowohl für die Entstehung als auch für die Therapie von degenerativen Erkrankungen im Bereich der Lendenwirbelsäule von großer Bedeutung (Schnake et al., 2019). Eine sagittale Imbalance kann sich stark auf das OP-Ergebnis auswirken. Aufgrund dessen, wird in den letzten Jahren vermehrt auf eine operative, physiologische Wiederherstellung der Lendenlordose geachtet (ebd.). Beim dem aufrechtstehenden Menschen ist der Rumpf in der Sagittalen im Gleichgewicht, wenn der Kopf über dem Sakrum sowie über beiden Femurköpfen steht. Die Vertikalachse erstreckt sich dabei von

C7 über die S1-Deckplatte durch die Mitte der beiden Femurköpfe (Charles et al., 2011). Aufgrund degenerativer Veränderungen kann sich diese Vertikalachse nach ventral verschieben und ein Ungleichgewicht auslösen. In den meisten Fällen wird das Ungleichgewicht zunächst durch eine Retroversion des Beckens im Bereich der Hüftgelenke kompensiert, später durch eine Flexion der Kniegelenke, damit der Kopf und der Rumpf gerade stehen (ebd.). Die Lordose im Bereich der LWS ist von L1 und S1 begrenzt, wobei die Stärke der Krümmung nach kaudal zunimmt. Laut mehrerer Studien besteht ein starker Zusammenhang zwischen der Lordose im Bereich der LWS und der Sakrumneigung. Je stärker die Sakrumneigung, desto stärker fällt die Krümmung der Lendenlordose aus (Guigui et al., 2003; Vaz et al., 2002). Einen noch größeren Einfluss auf das Ausmaß der Krümmung hat jedoch die ‚Pelvic Incidence‘, welche bei jedem Menschen individuell feststeht. Dementsprechend kann auch jede Lendenlordose unterschiedlich stark ausgeprägt sein (Legaye et al., 1998). Roussouly et al. (2005) unterscheiden in ihrer Klassifikation 4 physiologische Typen des sagittalen Gleichgewichts zwischen ‚Pelvic Incidence‘, Sakrumneigung und Lendenlordose:

- **Typ 1:** geringe Pelvic Incidence und Sakrumneigung mit einer kurzen kaudalen Lendenlordose und einer langgezogenen thorakolumbalen Kyphose
- **Typ 2:** geringe Pelvic Incidence und Sakrumneigung mit einem Flachrücken
- **Typ 3:** normale Pelvic Incidence und Sakrumneigung mit ausbalancierter lumbaler Lordose und thorakaler Kyphose
- **Typ 4:** starke Pelvic Incidence und Sakrumneigung mit ausgeprägter lumbaler Lordose und thorakaler Kyphose

Vermeehrt lässt sich eine anteriore Verlagerung des Körpergleichgewichts und somit eine erhöhte Bandscheibenbelastung bei den Typen 1 und 2 feststellen. Dem gegenüber beobachtet man eine posteriore Verlagerung des Körpergleichgewichts und eine Beckenretroversion bei Typ 4. Aufgründessen kommt es zu einer gesteigerten Belastung der Facettengelenke (Charles et al., 2011). Auf die ‚Pelvic Incidence‘, die Sakrumneigung sowie weitere Winkel und

Strecken, welche das sagittale Profil der Wirbelsäule beschreiben, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingegangen.

Um das Risiko des Eintretens einer Anschlussdegeneration zu senken, sind postoperativ verschiedene rückschonende sowie -stärkende Aktivitäten, gezielte Krankengymnastik, Rehasport und Rehabilitationsmaßnahmen angeraten. Bei eintretender Anschlussdegeneration oder Anschlussinstabilität mit Folgesymptomen ist jedoch ein Revisionseingriff, im Sinne einer Verlängerung der Instrumentationsstrecke, erforderlich (Bullmann, 2022).

## 1.6 Fragestellung und Arbeitshypothese

Die Anschlussdegeneration ist eine bereits bekannte und schwerwiegende Komplikation nach dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule. Vorherige Forschungsergebnisse diverser Studien konnten bereits eine Reihe von Risikofaktoren für das Entstehen der Anschlussdegeneration identifizieren. Das Ziel dieser Studie ist es, bei Patienten welche eine Anschlusspondylodese erhalten haben, demographische, radiologische und operative Einflussfaktoren zu untersuchen, welche einen prädiktiven Wert für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration besitzen. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Analyse der sagittalen Imbalance und auf die intra- und postoperative Änderung des sagittalen Wirbelsäulenprofils gelegt. Schlussfolgernd sollen die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen, das Risiko der Entstehung einer Anschlussdegeneration zu senken respektive den Zeitraum bis zur Entwicklung, dieser postoperativen, degenerativen Komplikation in den Anschlusssegmenten, auszudehnen.

Folgende Fragestellung lässt sich an dieser Stelle formulieren: Welche Risikofaktoren zur Entstehung einer Anschlussdegeneration lassen sich identifizieren und welchen Einfluss hat die postoperative Änderung des sagittalen Profils der Wirbelsäule auf die Entwicklung dieser degenerativen Veränderungen in den Anschlusssegmenten?

Die Arbeitshypothese dieser Arbeit lautet: Entscheidende positive Risikofaktoren für die Entstehung einer Anschlussdegeneration sind das Alter, BMI/Körpergewicht sowie das Geschlecht der Patienten. Zudem nimmt die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils Einfluss auf die Zeitspanne zwischen Fusionsoperation und Revisionseingriff.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Das Kollektiv

Insgesamt wurden 72 Patienten und Patientinnen in die vorliegende, retrospektive Studie aufgenommen, welche in der Universitätsklinik für Orthopädie in Tübingen zwischen 2003 und 2018 (Initialeingriff) behandelt wurden. Es wurden ausschließlich Patienten ausgewählt, bei denen mindestens zwei Eingriffe durchgeführt wurden: Eine initiale dorsale Fusion der Lendenwirbelsäule und mindestens ein Revisionseingriff, welcher zu einer Verlängerung der bereits zuvor fusionierten Strecke führte. Zudem wurden in der Studie nur Patienten berücksichtigt, bei denen degenerative Veränderungen der Anschlusssegmente ursächlich für den Revisionseingriff waren. Gemäß der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) erfasste die Studie keine personenbezogenen Daten und wurde vollständig anonym durchgeführt.

### 2.2 Studienablauf

Das erstellte Design der Studie entsprach den Vorgaben der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen und wurde am 14.12.2020 zugelassen und genehmigt (896/2020BO2).

Zunächst wurden n=986 Patienten ermittelt, welche in der Universitätsklinik für Orthopädie in Tübingen eine Fusionsoperation erhalten haben. Anhand der OP-Berichte sowie der Röntgenbilder wurde die Eignung zum Einschluss in diese Studie beurteilt. Bei der Auswahl der Patienten wurden folgende Fragen zur Aufnahme in diese Studie formuliert:

- Haben mindestens 2 operative Eingriffe (Initialer Fusionseingriff und mindestens ein weiterer Eingriff zur Verlängerung der Fusionsstrecke) stattgefunden?
- Ist die Ursache für den Initialeingriff eine degenerative Veränderung?
- Liegt die degenerative Veränderung im Bereich der Lendenwirbelsäule?
- Liegen die notwendigen Röntgenbilder zur Auswertung vor?

Nach erfolgter Selektion blieben n=72 Patienten übrig, welche die zuvor genannten Kriterien erfüllten. Für diese Patienten wurde mittels Microsoft Excel (Version 16.84) ein Datensatz angelegt und personenbezogene Informationen wie Geburtsdatum, Geschlecht, Größe, Gewicht und BMI erfasst. Um die Anonymität zu wahren und gleichzeitig eine Rückverfolgung der Daten gewährleisten zu können, wurden die Patienten unter ihrer Patienten-ID angelegt. Darüber hinaus wurden die Diagnosen der Patienten und die OP-Berichte mit in den Datensatz aufgenommen. Außerdem wurde das Datum der erfolgten Eingriffe erfasst um festzustellen, wie weit Initial- und Revisionseingriff auseinander liegen.

Anschließend wurden pro Patient jeweils 3 konventionelle Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule in der Sagittalen, mithilfe eines zuvor erstellten Auswertungsskriptes, vermessen. Dieses Auswertungsskript dient als diagnostische Grundlage zur Bewertung des sagittalen Wirbelsäulenprofils. Einbezogen wurden morphologische, positionelle und spinale Parameter zur Identifikation einer optimalen intraoperativen Gestaltung des sagittalen Profils. Bei den Röntgenaufnahmen handelt es sich um Aufnahmen von vor dem Initialeingriff, unmittelbar nach dem Initialeingriff und kurz vor dem Revisionseingriff. Zudem wurde das ‚Grading System of Mimura‘ und sofern ein MRT vorlag, eine Einteilung anhand der ‚Pfirrmann-Klassifikation‘ vorgenommen. Das Ziel hierbei war es, die degenerativen Veränderungen, welche zwischen Initial- und Revisionseingriff entstanden sind, zu erfassen und das sagittale Wirbelsäulenprofil beurteilen zu können.

## 2.3 Datensammlung

Für die Datenerhebung wurde ein Auswertungsskript konzipiert. Dieses wurde jeweils auf die 3 konventionellen Röntgenaufnahmen pro Studienteilnehmer angewendet. Hierbei handelte es sich um konventionelle Röntgenbilder der Wirbelsäule in einer Ebene (seitlich). Zunächst wurde immer das Röntgenbild vor dem Initialeingriff, anschließend das Röntgenbild unmittelbar nach dem Initialeingriff und zum Schluss das Röntgenbild kurz vor dem Revisionseingriff vermessen. Die Vermessung aller Röntgenaufnahmen erfolgte mittels Centricity WEB Viewer.

Die folgenden Parameter wurden in dem Auswertungsskript berücksichtigt und bei jeder der 3 Röntgenaufnahmen vermessen:

- Lumbar Lordotic Angle L1-L5, L1-S1
- L1 S1 Plumb Line
- Slope Angle Endplate S1
- Adjacent Disc Angle Caudal
- Adjacent Disc Height Caudal
- Adjacent Disc Angle Cranial
- Adjacent Disc Height Cranial
- Pelvic Tilt
- Pelvic Incidence
- Pfirrmann Classification
- Grading System of Mimura

Die zuvor aufgeführten Parameter sollen im Folgenden erläutert werden.

## 2.3.1 Auswertungsskript

### Lumbar Lordotic Angle



Abbildung 6: Lumbar Lordotic Angle

Der ‚Lumbar Lordotic Angle‘ ergibt sich aus der Deckplatte des L1-Wirbelkörpers und der Grundplatte des L5-Wirbelkörpers respektive durch die obere Ebene des S1-Wirbelkörpers (Bae & Mun, 2010). Bei der physiologischen Lordose liegt der ‚Lumbar Lordotic Angle‘ im Bereich von 31-50°. Von einer übermäßigen Lordose spricht man im Bereich von >70°, von einer Hypolordose bei 11-30° und von einer Lumbarkyphose bei <10° (ebd.).

## L1 S1 Plumb Line

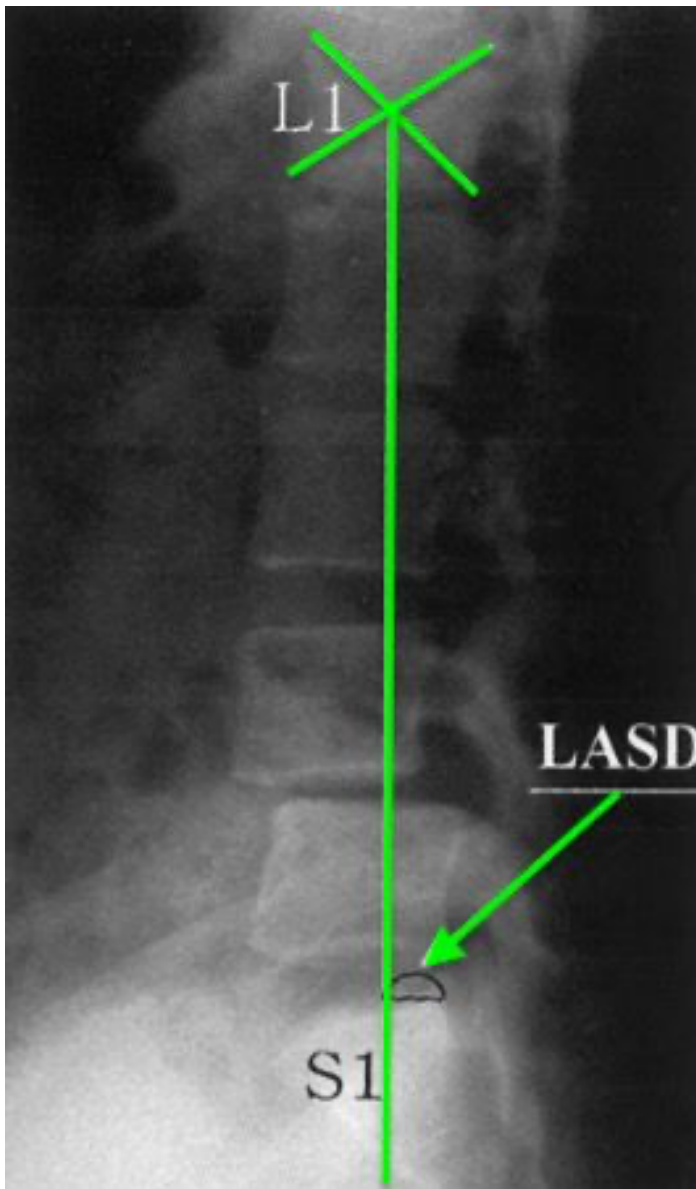


Abbildung 7: L1 Plumb Line

Die ‚L1 Plumb Line‘ beschreibt den Lotverlauf von der Mitte des Wirbelkörpers L1. Die ‚S1 Plumb Line‘ beschreibt den Lotverlauf von der Mitte des Wirbelkörpers S1. Zudem wurde der Abstand der beiden Linien zueinander gemessen. Dieser gibt Auskunft über die sagittale Balance bzw. Dysbalance der Lendenwirbelsäule (Angevine & McCormick, 2007).

## Slope Angle Endplate

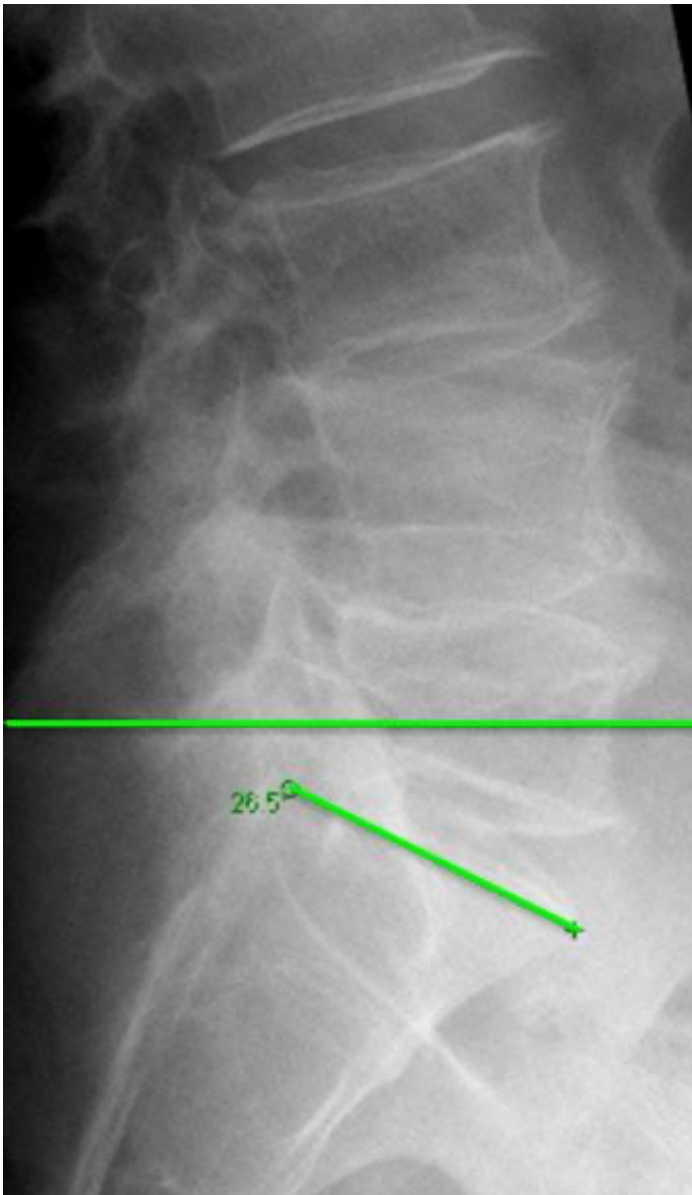


Abbildung 8: Slope Angle Endplate

Bei der ‚Slope Angle Endplate‘ (Sakralneigung) handelt es sich um den Winkel zwischen der Deckplatte des S1-Wirbelkörpers sowie der Horizontalen. Dieser Winkel liegt in der Regel zwischen 20-65° und liegt durchschnittlich bei 40°. Er steht in direkter Korrelation zur Lordose der Lendenwirbelsäule (Savarese et al., 2020).

## Adjacent Disc Angle Caudal, Adjacent Disc Height Caudal

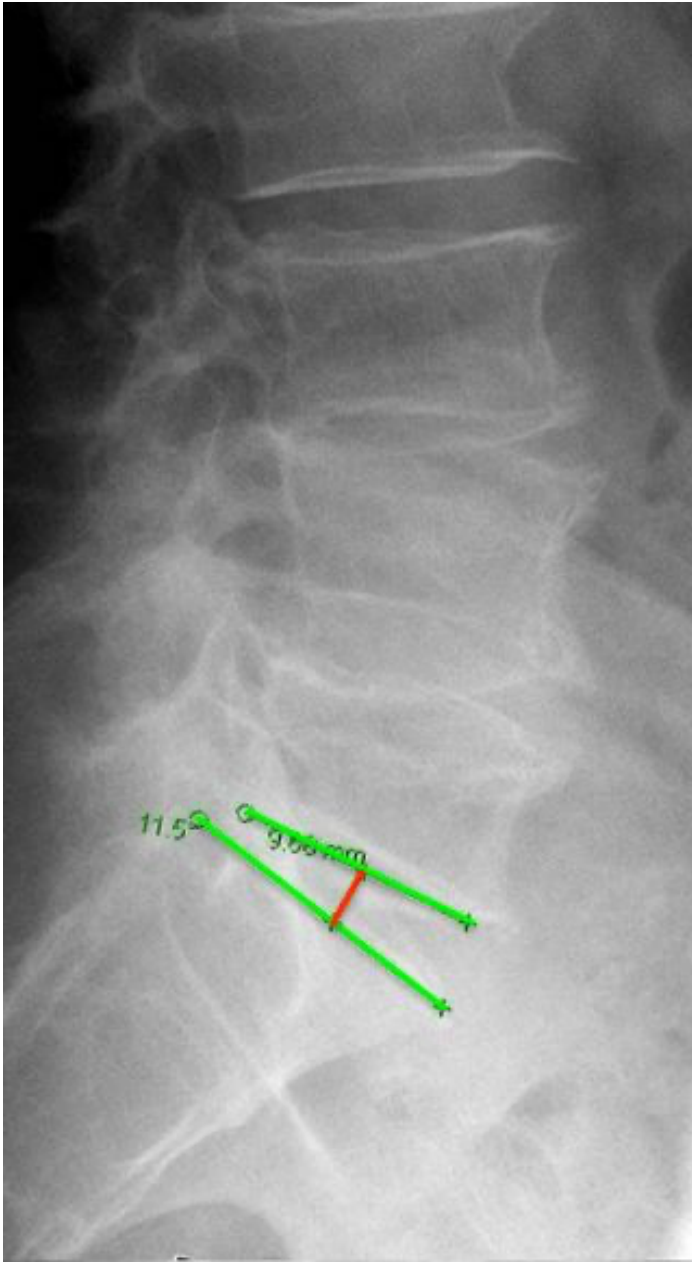


Abbildung 9: Adjacent Disc Angle Caudal, Adjacent Disc Height Caudal

Beim ‚Adjacent Disc Angle Caudal‘ handelt es sich um den Winkel zwischen der unteren Ebene des untersten fusionierten Wirbelkörpers und der oberen Ebene des unterhalb angrenzenden Wirbelkörpers. Zudem wird der Abstand der Mittelpunkte auf den 2 Ebenen zueinander gemessen (‚Adjacent Disc Height Caudal‘).

## Adjacent Disc Angle Cranial, Adjacent Disc Height Cranial

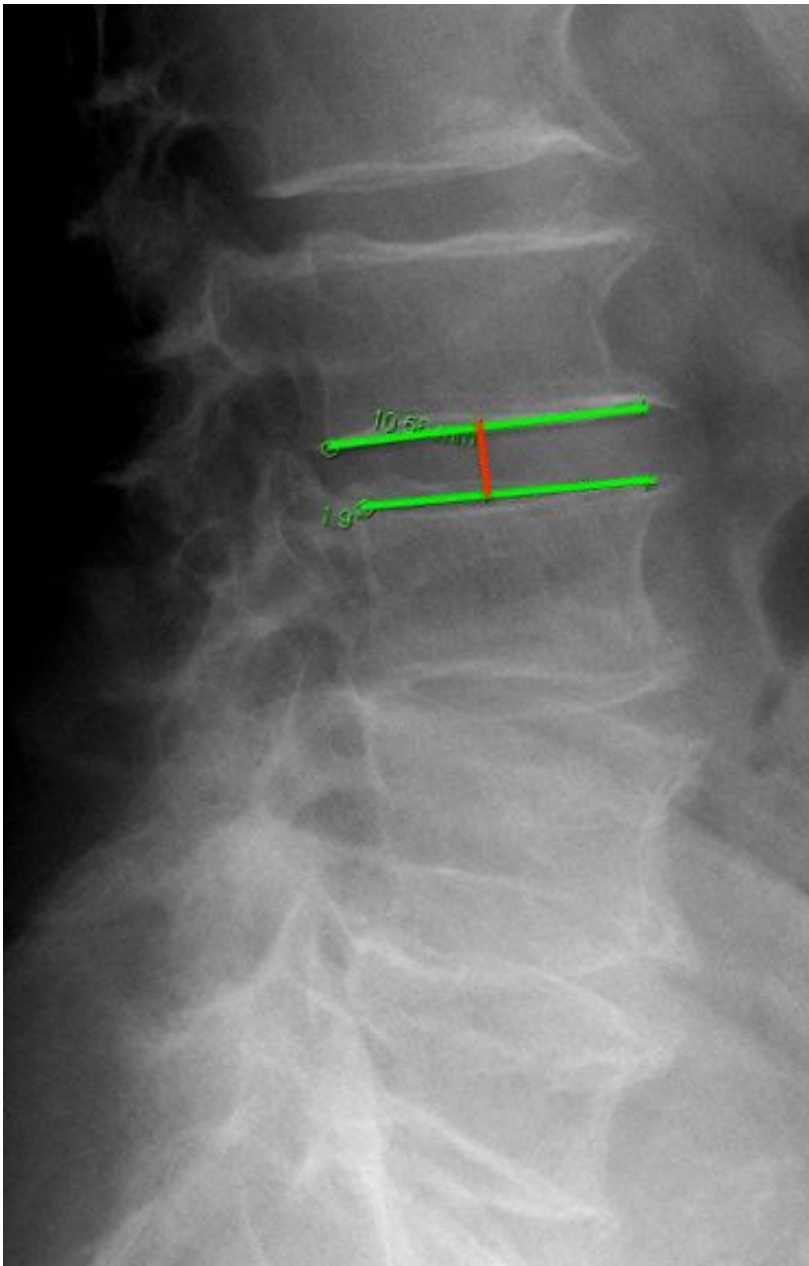


Abbildung 10: Adjacent Disc Angle Cranial, Adjacent Disc Height Cranial

Beim ‚Adjacent Disc Angle Cranial‘ handelt es sich um den Winkel zwischen der oberen Ebene des obersten fusionierten Wirbelkörpers und der unteren Ebene des oberhalb angrenzenden Wirbelkörpers. Zudem wird der Abstand der Mittelpunkte auf den zwei Ebenen zueinander gemessen (‚Adjacent Disc Height Cranial‘).

## Pelvic Tilt

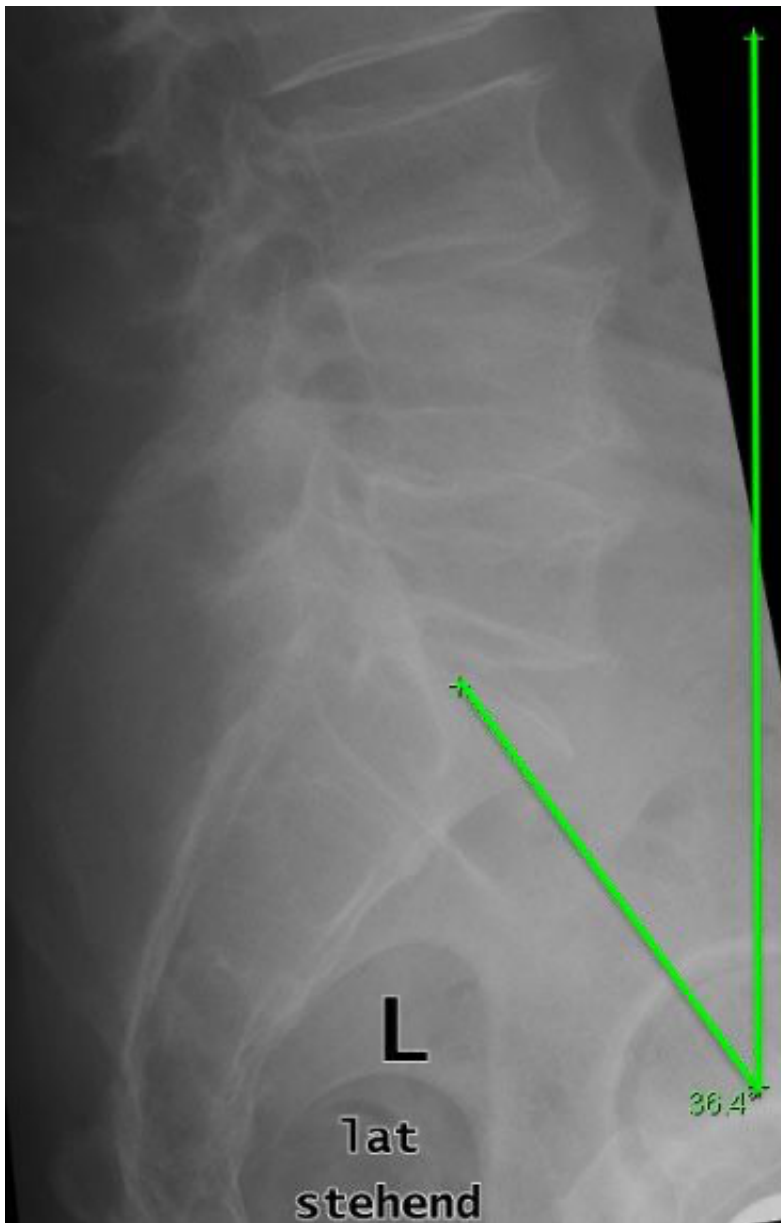


Abbildung 11: Pelvic Tilt

Beim ‚Pelvic Tilt‘, oder auch Beckenkipfung genannt, handelt es sich um den Winkel zwischen einer senkrecht, vertikal gezogenen Linie und der Verbindungslinie, die den Mittelpunkt der S1-Endplatte mit dem Mittelpunkt des Hüftkopfes verbindet (Savarese et al., 2020). Somit gibt dieser Winkel Auskunft über die Rotationsausrichtung des Beckens um die Hüftköpfe.

## Pelvic Incidence

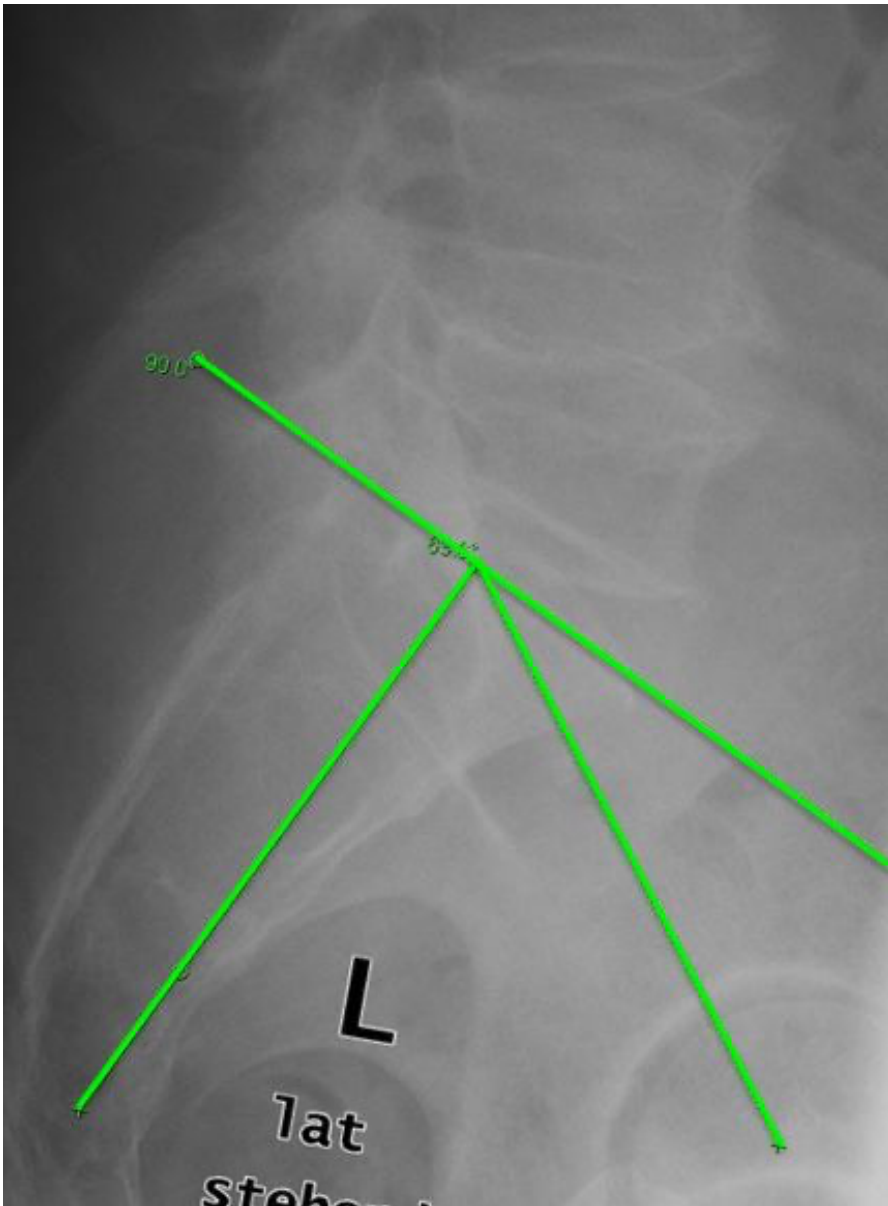


Abbildung 12: Pelvic Incidence

Bei der ‚Pelvic Incidence‘ handelt es sich um den Winkel zwischen einer senkrechten Linie zur oberen Endplatte des Wirbelkörpers S1 und der Linie, welche den Mittelpunkt der Endplatte mit dem Mittelpunkt des Hüftkopfes verbindet (Savarese et al., 2020).

Abbildung 13 beschreibt die zuvor beschriebenen radiologischen Lendenwirbelsäulenparameter schematisch (Walter et al., 2021):

- Lumbale Lordose (LL)
- Pelvic Tilt (PT)
- Sacral Slope (SS)
- Pelvic Incidence (PI)

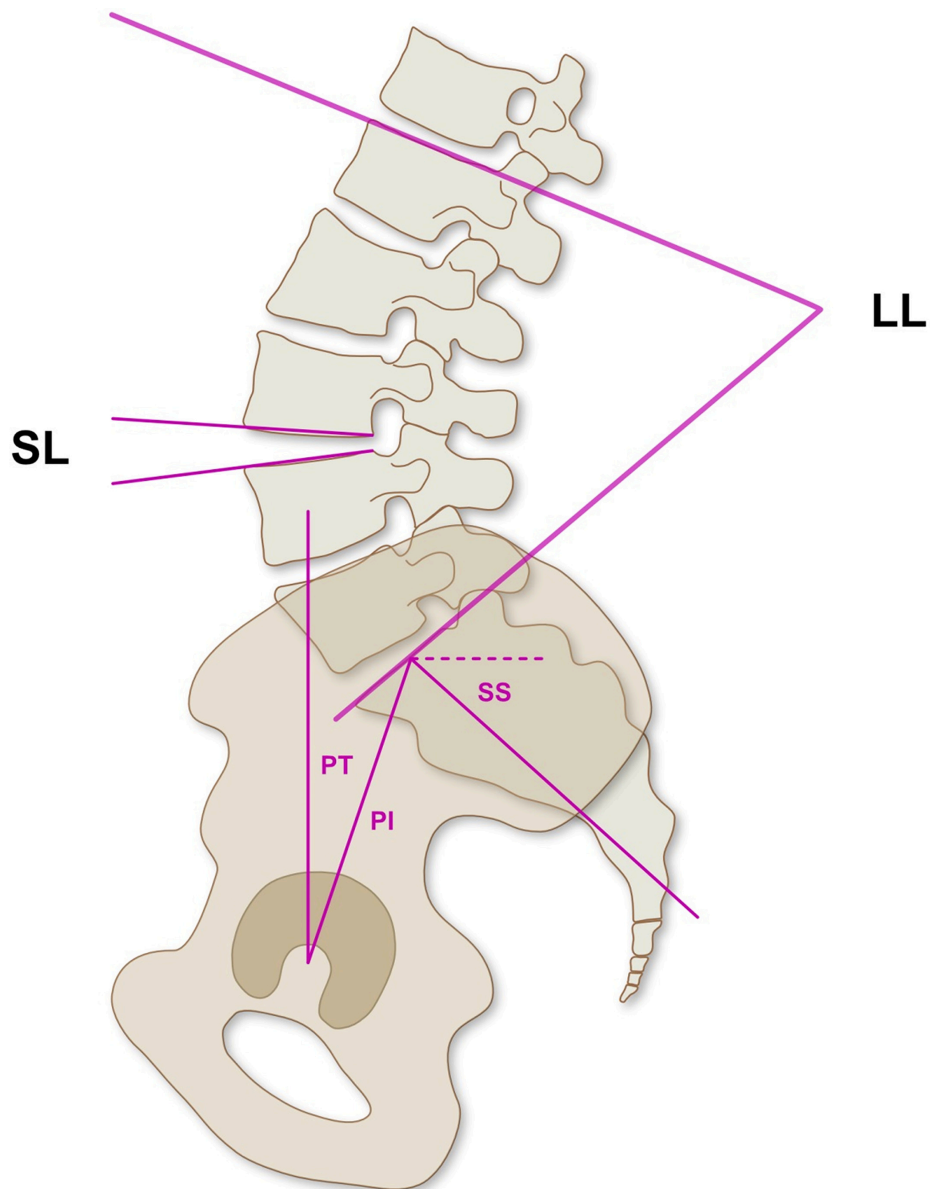


Abbildung 13: Schematische Darstellung der radiologischen Lendenwirbelsäulenparameter (Walter et al., 2021)

### 2.3.2 Pfirrmann Klassifikation

Die Bandscheibendegeneration durchläuft einen stadienhaften Verlauf und hat zu unterschiedlichen Klassifikationen geführt. Das größte internationale Ansehen hat dabei die kernspintomografische Klassifikation nach Pfirrmann erhalten (Pfirrmann et al., 2001). Pfirrmann (2001) unterscheidet anhand eines MRT zwischen Grad I bis Grad V:

- **Grad I**
  - Die Bandscheibe ist homogen mit heller, hyperintenser, weißer Signalintensität und normaler Bandscheibenhöhe
  
- **Grad II**
  - Die Bandscheibe ist inhomogen, behält aber die hyperintense, weiße Signalintensität
  - Nukleus und Anulus sind deutlich differenziert und es kann ein graues, horizontales Band vorhanden sein
  - Die Höhe der Bandscheibe ist normal
  
- **Grad III**
  - Die Bandscheibe ist inhomogen mit einer intermittierenden, grauen Signalintensität
  - Die Unterscheidung zwischen Nukleus und Anulus ist unklar
  - Die Höhe der Bandscheibe ist normal oder leicht vermindert
  
- **Grad IV**
  - Die Bandscheibe ist inhomogen mit einer hypointensen, dunkelgrauen Signalintensität
  - Es gibt keine Unterscheidung mehr zwischen Nukleus und Anulus
  - Die Höhe der Bandscheibe ist leicht oder mäßig verringert

- **Grad V**

- Die Bandscheibe ist inhomogen mit einer hypointensen, schwarzen Signalintensität
- Es gibt keine Unterscheidung mehr zwischen Nukleus und Anulus
- Der Bandscheibenraum ist kollabiert

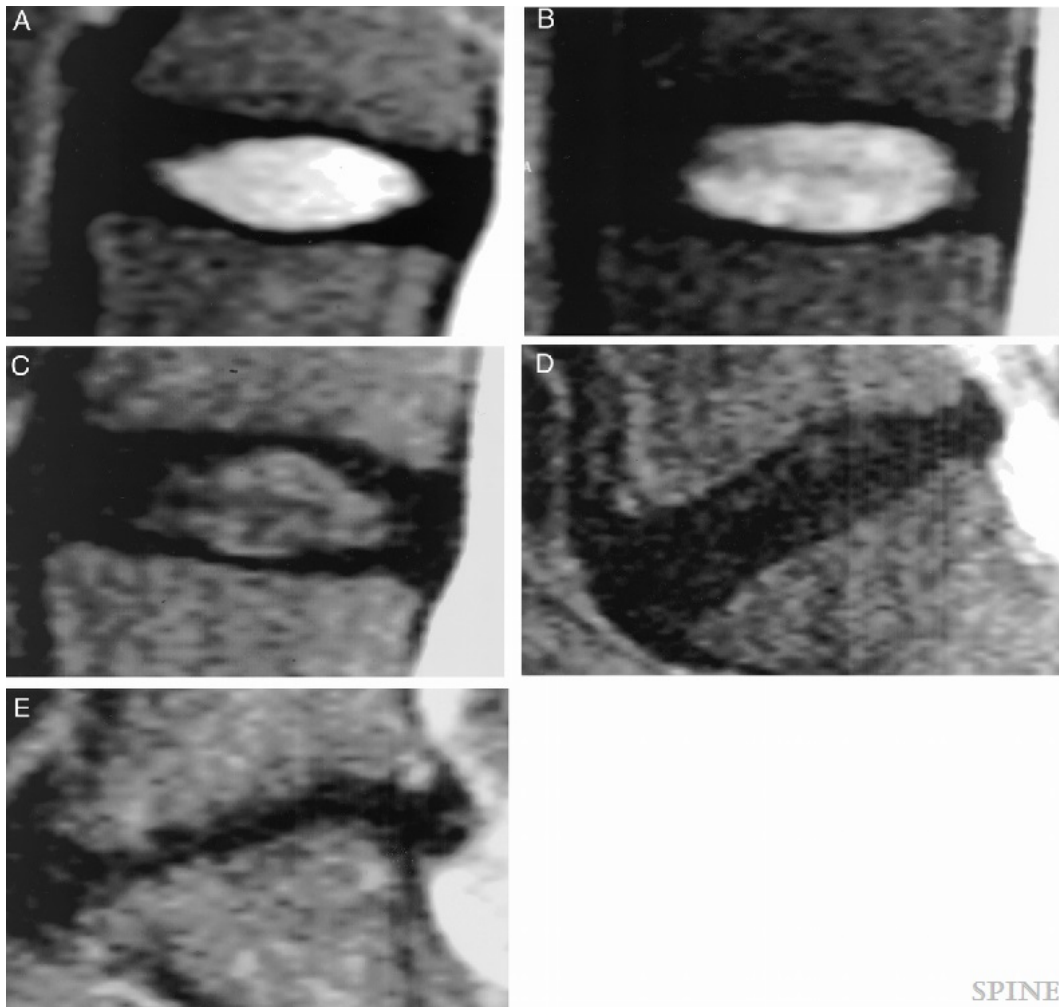


Abbildung 14: Bewertungssystem zur Beurteilung der lumbalen Bandscheibendegeneration A-E (Grad I-V) (Pfirrmann et al., 2001)

### 2.3.3 Grading System of Mimura

Ziel der von Mimura beschriebenen röntgenologischen Einteilung der lumbalen Bandscheibendegeneration in lateraler und antero-posteriorer Ansicht ist es, die Auswirkungen der Degeneration auf die Beweglichkeit zu untersuchen. Anhand der Punkte, welche für die Bandscheibenhöhe, mögliche Osteophyten und eine mögliche Sklerose an der Endplatte vergeben werden, wird jede Bandscheibe in Grad 1-4 eingestuft (Mimura et al., 1994).

**Table 12** Radiographic grading of lumbar disc degeneration on lateral and antero-posterior views described by Mimura et al. [47]

Disc height changes (% of adjacent discs)	Osteophyte formation (Sum of points on 8 Edges: <3 mm 1 pt., >3 mm 2 points.)	Endplate sclerosis
0 = Normal	0 = 0 point	0 = None
1 = Mild (> 75%)	1 = 1-4 points	1 = Either endplate
2 = Moderate (> 50%)	2 = 5-8 points	2 = Both endplates
3 = Severe (> 25%)	3 = 9-12 points	
4 = Very severe (< 25%)	4 = 13-16 points	

The purpose was to investigate the effect of degeneration on flexibility. According to the sum of the disc height, osteophyte, and sclerosis scores, each disc was graded on a scale of 1 to 4 with:  
 Grade 1 being 0.0 to 1.5 points  
 Grade 2 being 2.0 to 3.5 points  
 Grade 3 being 4.0 to 6.0 points  
 Grade 4 being > 6.0 points

Abbildung 15: Grading System of Mimura (Mimura et al., 1994)

## 2.4 Statistische Auswertung

Nach Abschluss der Datenerhebung wurde der Datensatz mithilfe von Microsoft Office Excel (Microsoft Office 2010, Version 14.0.7) verwaltet und anschließend zur statistischen Analyse in SPSS (Version 25.0.0.1) übertragen. Die initiale Analyse umfasste die Erstellung von Häufigkeitsverteilungen und Kontingenztabelle. Zudem wurden Unabhängigkeitstestungen mittels Chi-Quadrat-Test durchgeführt. Der Chi-Quadrat-Test dient als Signifikanztest, welcher die stochastische Unabhängigkeit zwischen zwei kategorialen oder nominalen Variablen überprüft. Nach Festlegung der Nullhypothese und Erstellung der Kontingenztabelle wurden die relativen Häufigkeiten der verschiedenen Merkmalskombinationen ermittelt. Anschließend wurde die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Merkmalspaaren berechnet. Unter der Annahme der Gültigkeit der Nullhypothese und der stochastischen Unabhängigkeit der beiden Merkmale entsprechen die bedingten Wahrscheinlichkeiten den Einzelwahrscheinlichkeiten der Merkmalsausprägungen. Die beobachteten Häufigkeiten wurden mit den erwarteten Häufigkeiten gemäß der Nullhypothese verglichen und der p-Wert berechnet. Der p-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher die Nullhypothese gerade noch abgelehnt werden kann. Eine Signifikanz wurde für Werte von  $<0,05$  festgelegt. Darüber hinaus wurde der Korrelationskoeffizient  $r$  berechnet. Dieser stellt ein Maß dar, um die lineare Beziehung zwischen 2 Variablen in einer Korrelationsanalyse zu analysieren. Für 2 Variablen wird die Distanz jedes Datenpunktes vom Mittelwert der Variablen gegenübergestellt, um die Anpassung der Relation zwischen den Variablen, an eine imaginäre Gerade, durch die Daten zu bewerten. Zudem wurde der t-Test durchgeführt um zu bestimmen, ob es signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen gibt. Des Weiteren wurde eine Kaplan-Meier-Überlebensanalyse durchgeführt.

### 3. Ergebnisse

Für die nachfolgenden Ergebnisse wurden in der Patientenkohorte demographische, radiologische und operative Faktoren untersucht, welche einen prädiktiven Wert für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration darstellen. Dabei wurde neben personenbezogener Parameter ein besonderer Fokus auf die Analyse der sagittalen Imbalance sowie auf die postoperative Änderung des sagittalen Profils gelegt.

#### 3.1 Populationscharakteristika

Das Studienkollektiv umfasste insgesamt  $n=72$  Patienten, von denen  $n=20$  (27,8%) männlich und  $n=52$  (72,2%) weiblich waren. Die Geschlechterverteilung ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt:

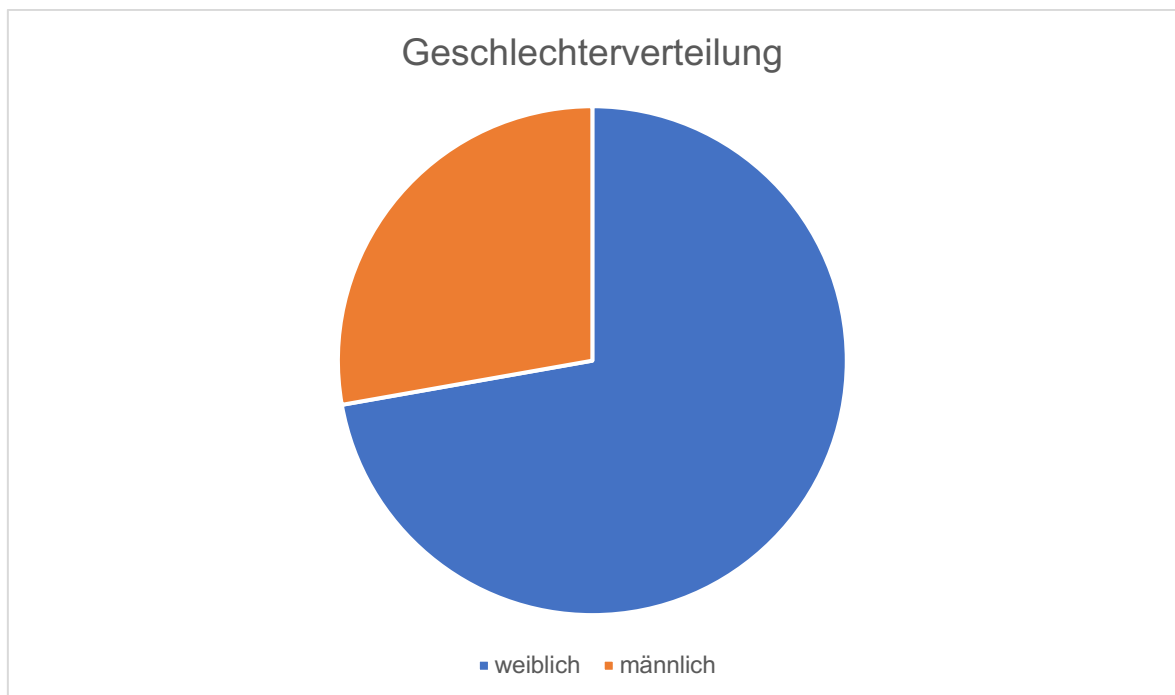


Abbildung 16: Geschlechterverteilung

Folgend wurde die Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff in Abhängigkeit vom Geschlecht der Patienten untersucht. Die männlichen Studienteilnehmer wiesen dabei eine durchschnittliche Überlebenszeit von 65,9 Monaten und die weiblichen Teilnehmerinnen von 55,17 Monaten auf. An dieser Stelle ließ sich kein signifikanter Zusammenhang, zwischen dem Geschlecht und der Überlebenszeit bis zum Auftreten einer Anschlussdegeneration, feststellen. Abbildung 17 verdeutlicht die Ergebnisse grafisch:

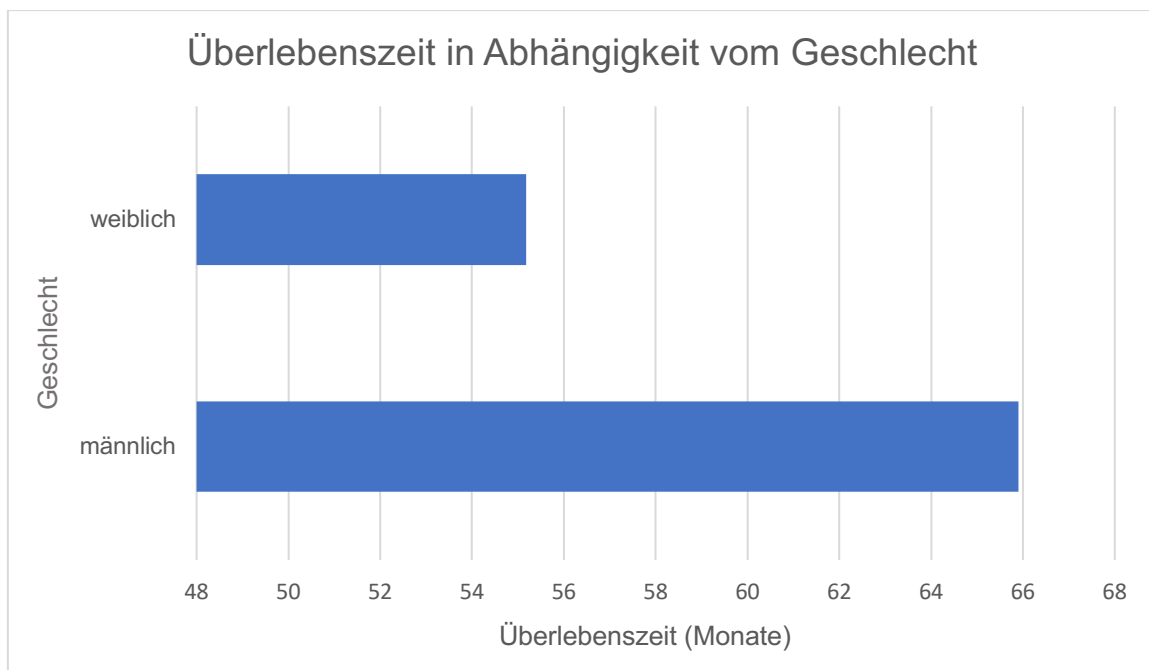


Abbildung 17: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Geschlecht

Der jüngste Studienteilnehmer dieser Untersuchung war zum Zeitpunkt der Initialoperation 24 und der älteste 83 Jahre alt (MW= 60,13; SD±12) (Abbildung 18).

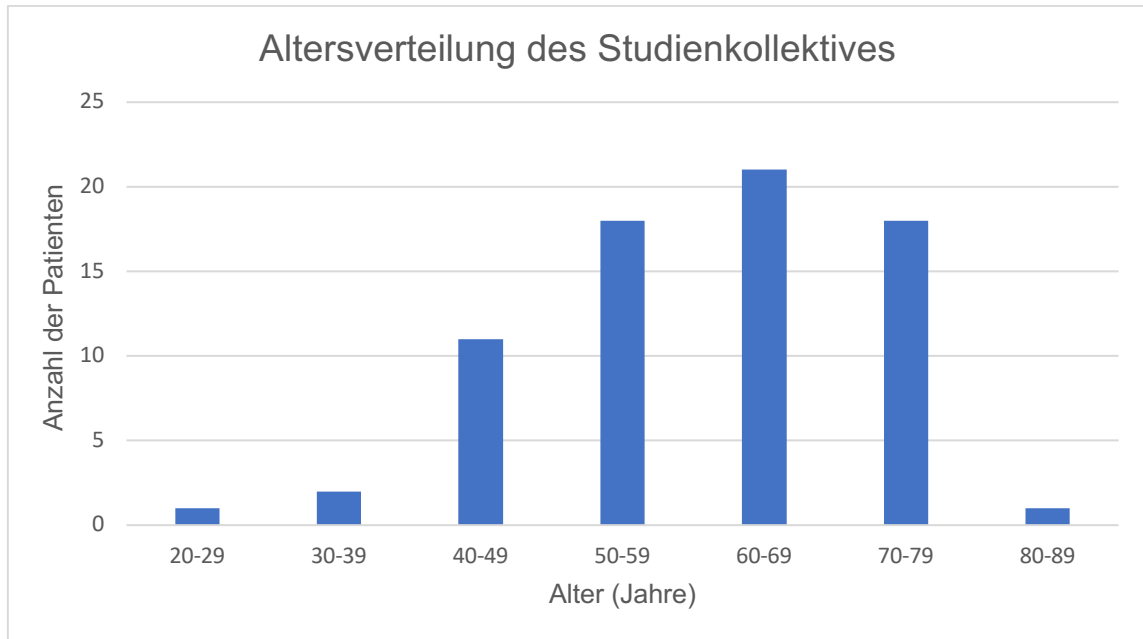


Abbildung 18: Altersverteilung

Weiterführend wurde die Zeitspanne zwischen dem Initial- und dem Revisionseingriff in Abhängigkeit vom Alter der Studienteilnehmer untersucht. Hinsichtlich der Merkmale Zeitspanne und Alter des Patienten ergab sich an dieser Stelle eine signifikant negative Korrelation ( $r=-0,26$ ;  $p=0,03$ ). In Tabelle 1 sind die Überlebenszeiten in Abhängigkeit vom Alter der Patienten dargestellt und Abbildung 19 verdeutlicht diese grafisch:

Tabelle 1: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Alter

Alter (Jahre)	Anzahl	Überlebenszeit bis Revisionseingriff (Monate)
20-29	n=1	66
30-39	n=2	88,5
40-49	n=11	53,55
50-59	n=18	72,61
60-69	n=21	58,81
70-79	n=18	43,56
80-89	n=1	29

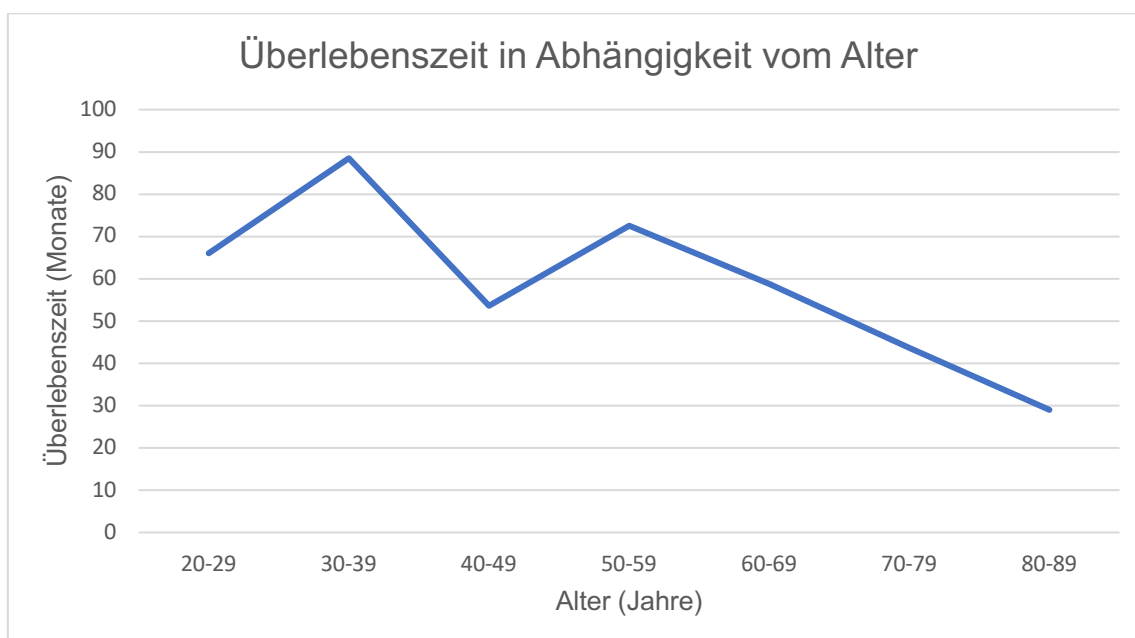


Abbildung 19: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom Alter

Des Weiteren wurde der Body-Mass-Index (BMI) zur Bewertung des Körpergewichts der Patienten ermittelt. Die WHO unterscheidet bezüglich des BMI folgende Kategorien (WHO, 2000):

- $<16 \text{ kg/m}^2$ : kritisches Untergewicht
- $16-18,5 \text{ kg/m}^2$ : Untergewicht
- $18,5-25 \text{ kg/m}^2$ : Normalgewicht
- $25-30 \text{ kg/m}^2$ : leichtes Übergewicht
- $> 30 \text{ kg/m}^2$ : Übergewicht

Anhand der Angaben zum Körpergewicht und zur -größe konnten folgende Werte für den BMI bestimmt werden:

Tabelle 2: BMI

BMI ( $\text{kg/m}^2$ )	Anzahl
$<16$	n=0
16-18,5	n=1
18,6-24,9	n=9
25-29,9	n=23
$>30$	n=28
k.A.	n=11

Der Body-Mass-Index der Kohorte lag durchschnittlich bei  $29,55 \text{ kg/m}^2$  (n=61). Bei 11 Patienten lagen nicht die notwendigen Daten zur Berechnung des BMI's vor.

Weiterführend wurde die Überlebenszeit der Patienten bis zum Auftreten einer Anschlussdegeneration in Abhängigkeit vom BMI bestimmt. Der Patient mit einem BMI von  $16-18,5 \text{ kg/m}^2$  (n=1) wies eine Überlebenszeit von 48 Monaten, diejenigen von  $18,5-25 \text{ kg/m}^2$  (n=9) von durchschnittlich 22,8 Monaten und Patienten mit einem BMI von  $25-30 \text{ kg/m}^2$  (n=23) eine Zeit von durchschnittlich 27,32 Monaten auf. Patienten mit einem BMI von  $>30$  (n=28) zeigten eine durchschnittliche Überlebenszeit von 34,02 Monaten (Abbildung 20):

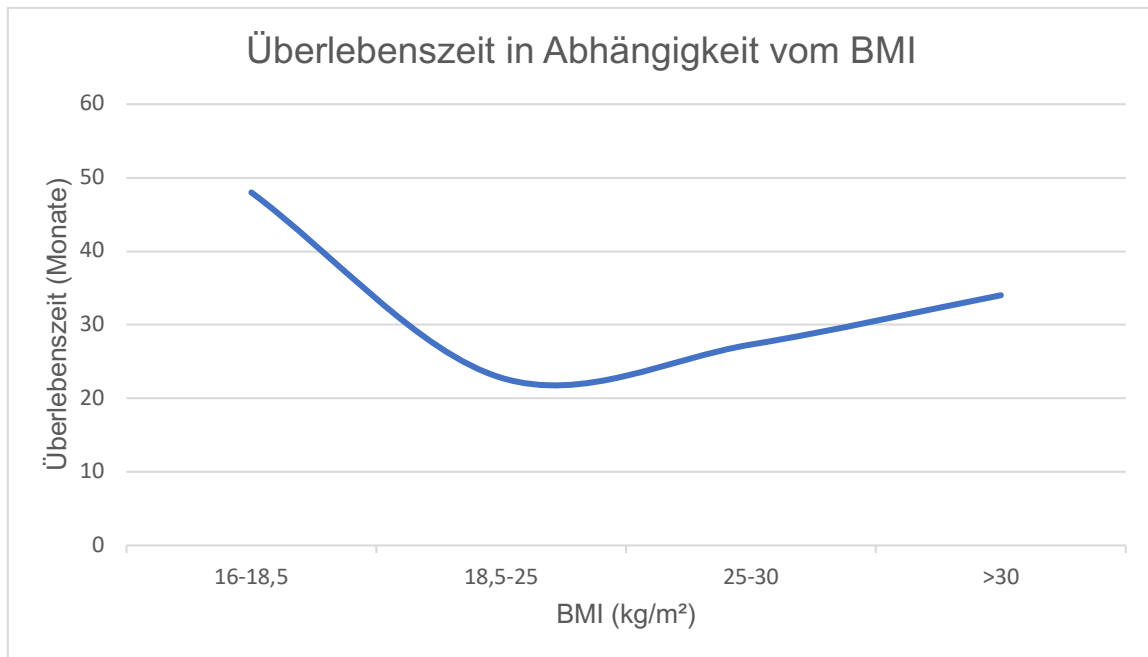


Abbildung 20: Überlebenszeit in Abhängigkeit vom BMI

An dieser Stelle ergab sich keine statistisch signifikante Korrelation zwischen einem hohen BMI und der Zeitspanne zwischen den Eingriffen.

## 3.2 Radiologische Ergebnisse

Bei n=69 Patienten wurden jeweils drei konventionelle Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule in einer Ebene (seitlich) erstellt. 3 Patienten (4,2%) wurden bei der röntgenradiologischen Auswertung nicht berücksichtigt, da keine präoperativen Röntgenaufnahmen vorhanden waren.

### 3.2.1 Lumbale Lordose

In der gesamten Kohorte ergab sich ein Durchschnittswert für die präoperative lumbale Lordose von 46,12° und ein durchschnittlicher postoperativer Wert von 44,78°. Die kleinste gemessene, präoperative lumbale Lordose im Gesamtkollektiv lag bei 13° und der größte gemessene Wert bei 78,9°. Postoperativ lag der kleinste gemessene Wert bei 18,7° und der größte bei 75,9°.

### 3.2.2 Pelvic Tilt

Bezüglich des ‚Pelvic Tilts‘ ergab sich in der Gesamtpopulation ein Mittelwert von 23,33° präoperativ und von 22,24° postoperativ. Der präoperativ gemessene Minimalwert betrug 1° und der Maximalwert 56°. Postoperativ lag der Minimalwert bei 0,1° und der Maximalwert bei 43,1°. Im Vergleich der prä- und postoperativen Werte wurde bei 37 Patienten eine Verkleinerung und bei 32 Patienten eine Vergrößerung des ‚Pelvic Tilts‘ beobachtet.

### 3.2.3 Pelvic Incidence

Die ‚Pelvic Incidence‘ ergab einen Mittelwert von 62° (n=69) präoperativ und von postoperativ 61,43° (n=69) im gesamten Patientenkollektiv. Der präoperative gemessene Minimalwert lag bei 35° und der Maximalwert bei 107°. Postoperativ lag der kleinste gemessene Wert bei 32,6° und der größte bei 86,7°.

## 3.3 Operative Parameter

### 3.3.1 Fusionslänge

Des Weiteren wurde die Fusionslänge im Initialeingriff untersucht. Bei n=27 Patienten konnte eine Fusionslänge von 2 Segmenten, bei n=20 von 3 Segmenten und bei n=11 Patienten von 4 Segmenten ermittelt werden. Bei n=5 Patienten zeigte sich eine Fusionslänge von 5 Segmenten, bei n=3 Patienten von 6 Segmenten und n=1 Patient erhielt einer Fusion von 7 Segmenten. Bei n=1 Patienten wurde eine Fusionsstrecke von 9 Segmenten verzeichnet. Von n=4 Patienten lagen keine verwertbaren Informationen vor. Der Mittelwert der Kohorte lag insgesamt bei 3,19 versteiften Segmenten (n=68, SD=1,4).

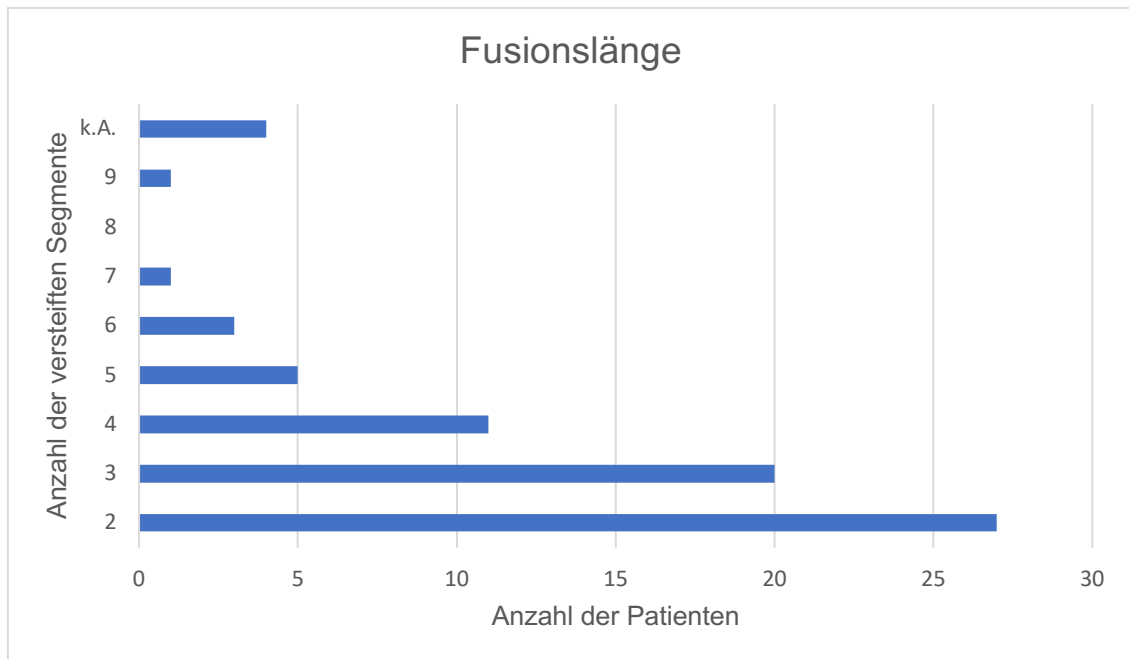


Abbildung 21: Fusionslänge

Auch an dieser Stelle ergab die statistische Auswertung keine positive oder negative signifikante Korrelation hinsichtlich der Fusionslänge und der Überlebenszeit bis zur Anschlussdegeneration.

Weiterführend wurde der Zusammenhang zwischen der Fusionslänge und der Überlebenszeit zwischen Initial- und Revisionseingriff statistisch ermittelt. Die durchschnittlich längste Überlebenszeit wiesen die Patienten mit 4 versteiften Segmenten auf (67,36 Monate), gefolgt von den Patienten mit 2 (63,48 Monate) und denen mit 6 versteiften Segmenten (60,33 Monate). Die Patienten mit 3 versteiften Segmenten zeigten eine Überlebenszeit von 51,95 Monaten und diejenigen mit 5 von 42,4 Monaten. Mit 7 versteiften Segmenten wiesen die Patienten eine durchschnittliche Überlebenszeit von 26 Monaten und mit 9 von 23 Monaten auf. In Abbildung 22 werden die zuvor aufgeführten Ergebnisse grafisch dargestellt:

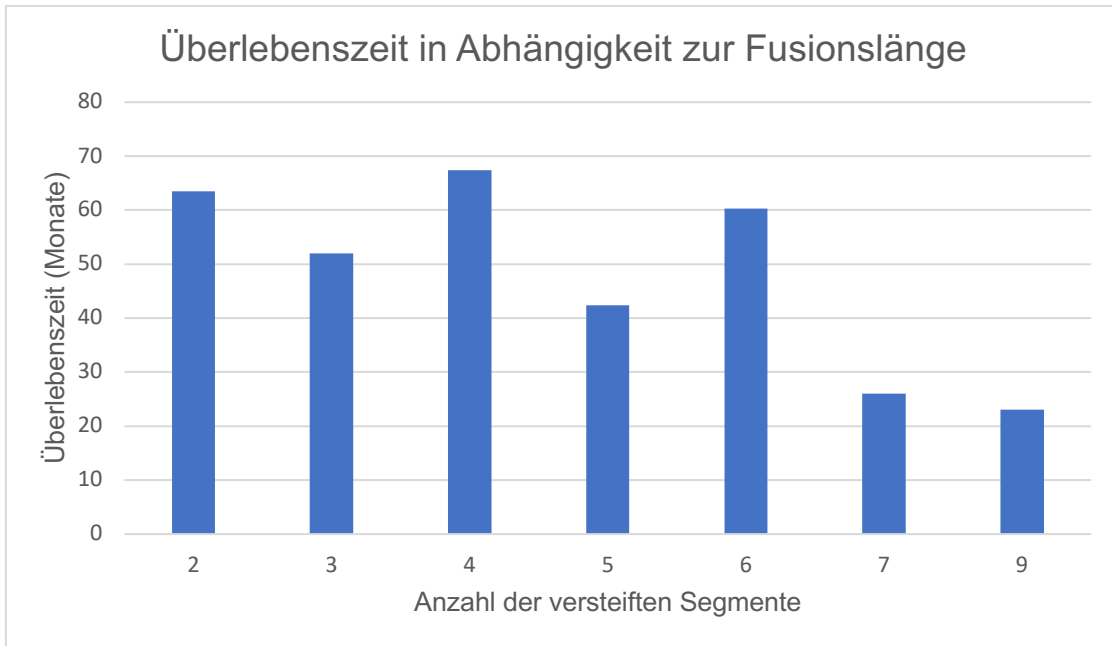


Abbildung 22: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Fusionslänge

An dieser Stelle ergaben die Ergebnisse der statistischen Auswertung keine Signifikanz hinsichtlich der Überlebenszeit bis zur Anschlussdegeneration in Abhängigkeit von der intraoperativen Fusionslänge während des Initialeingriffes.

### 3.3.2 Inklusion von L5/S1

Im weiteren Verlauf wurde das Patientenkollektiv dahingehend untersucht, ob bei der Initialoperation eine Fusion mit Inklusion von S1 durchgeführt wurde. Bei 54% der Studienteilnehmer (n=39) kam es zu einer Inklusion von S1 und bei 42% (n=30) war dies nicht der Fall. Bei 4% der Patienten (n=3) konnte diesbezüglich keine Aussage getroffen werden, da kein zuverlässig auswertbares, präoperatives Röntgenbild vorlag (Abbildung 23).

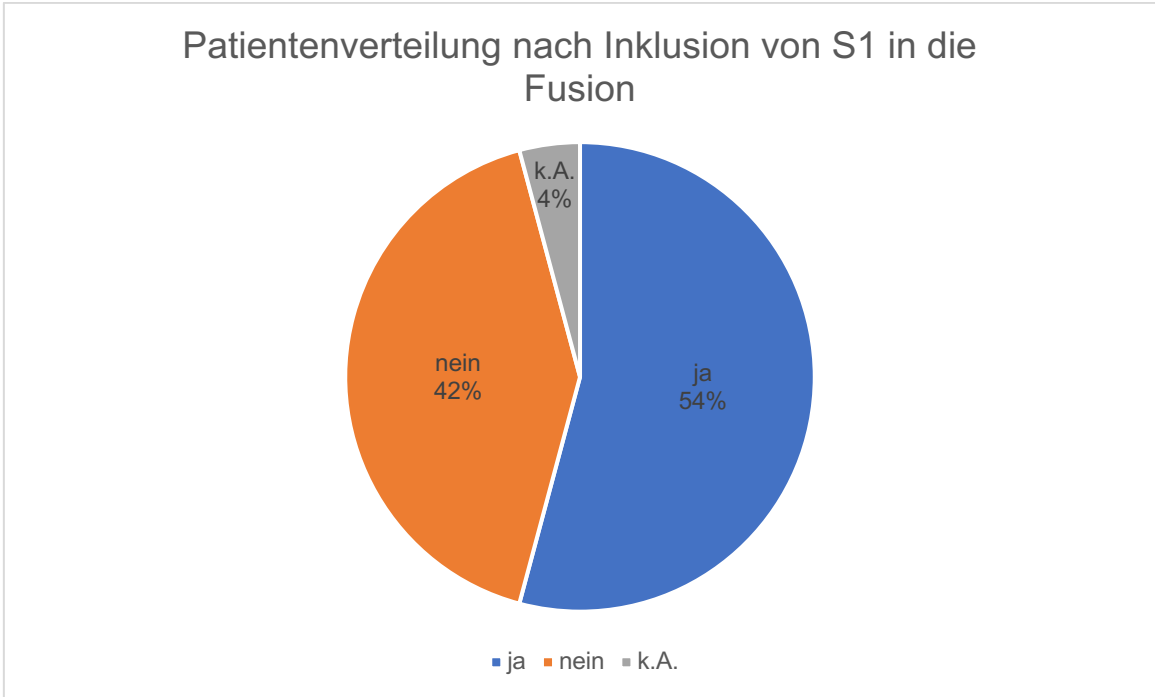


Abbildung 23: Inklusion von S1

Korreliert man die Inklusion von S1 in die Fusion mit der Überlebenszeit zwischen Initial- und Revisionseingriff, so wiesen die Patienten, welche eine Fusion mit Inklusion von S1 erhalten haben, eine Zeitspanne von durchschnittlich 60,69 Monaten bis zum Auftreten einer Anschlussdegeneration auf. Patienten, die eine Fusion ohne Inklusion von S1 erhalten haben, zeigten hingegen nur eine Überlebenszeit von 54,5 Monaten zwischen beiden Eingriffen (Abbildung 24).

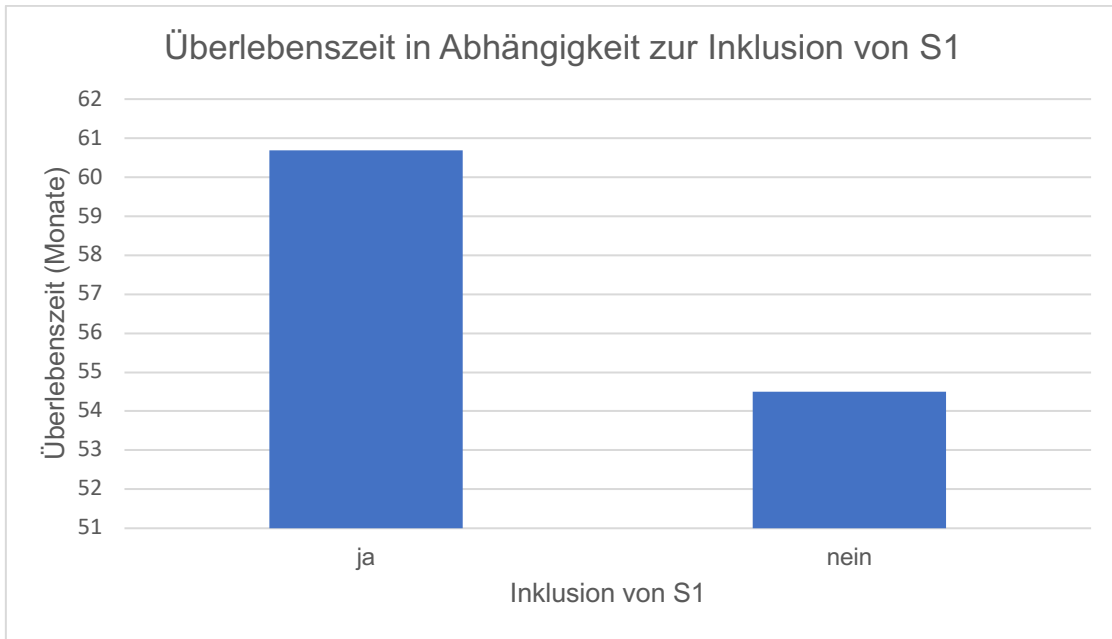


Abbildung 24: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Inklusion von S1

Trotz der zuvor aufgeführten Ergebnisse konnte an dieser Stelle keine Signifikanz der Inklusion von S1 in Korrelation zur Überlebenszeit ermittelt werden. Die Inklusion von L5/S1 nimmt in dieser Untersuchung somit keinen Einfluss auf die Überlebenszeit bis zum Auftreten einer Anschlussdegeneration.

### 3.4 Überlebenszeit bis zur Anschlussdegeneration

Um weitere potenzielle Einflussfaktoren auf die Überlebenszeit zu ermitteln, wurden weitere Untersuchungen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Anschlussdegeneration zwischen beiden Eingriffen, durchgeführt. Insgesamt betrug die Überlebenszeit zwischen beiden Eingriffen in der Gesamtkohorte durchschnittlich 58,12 Monate (n=72, Median=44,5). Abbildung 25 verdeutlicht die Wahrscheinlichkeit, mit welcher Zeit sich eine Anschlussdegeneration entwickelt, grafisch.

## Überlebenskurve

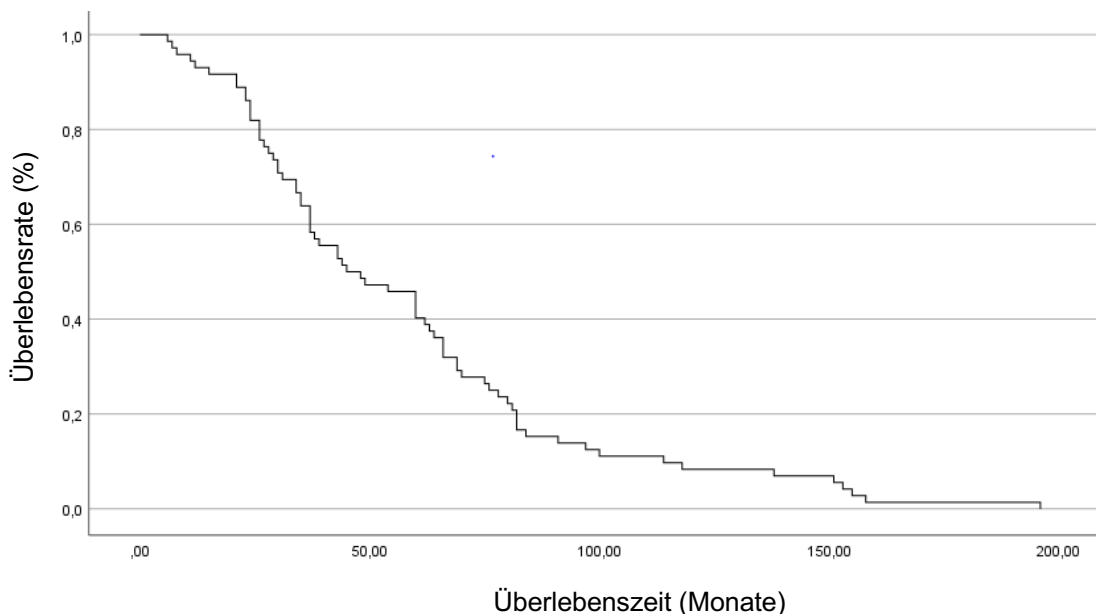


Abbildung 25: Überlebenskurve in Bezug auf die Gesamtkohorte

Beträgt die Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose  $\pm 10^\circ$ , so spricht man von einer sagittalen Balance im Bereich der Lendenwirbelsäule. Liegt diese Differenz jedoch außerhalb dieser Spannweite, spricht man von einer sagittalen Imbalance. In der vorliegenden Studie wiesen  $n=35$  Patienten eine postoperativ normwertige Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose auf. Dabei konnte eine Überlebenszeit von durchschnittlich 68,1 Monaten zwischen beiden Eingriffen ermittelt werden ( $SE=7,9$ ). Dagegen wiesen  $n=37$  Patienten eine postoperativ nicht normwertige Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose auf. Hier ergab sich eine durchschnittliche Überlebenszeit von 48,7 Monaten ( $SE=5,1$ ). Patienten mit einer normwertigen postoperativen Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose zeigen schlussfolgernd eine deutlich längere Zeitspanne zwischen den Operationen, als Patienten, welche außerhalb der Normwerte liegen ( $t(70)=2,07$ ;  $p=0,04$ ). In Abbildung 26 ist die Wahrscheinlichkeit, mit welcher Zeit sich eine Anschlussdegeneration in Bezug auf die normwertige bzw. nicht normwertige Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose entwickelt, dargestellt.

## Überlebenskurve in Abhängigkeit der Differenz PI-LL

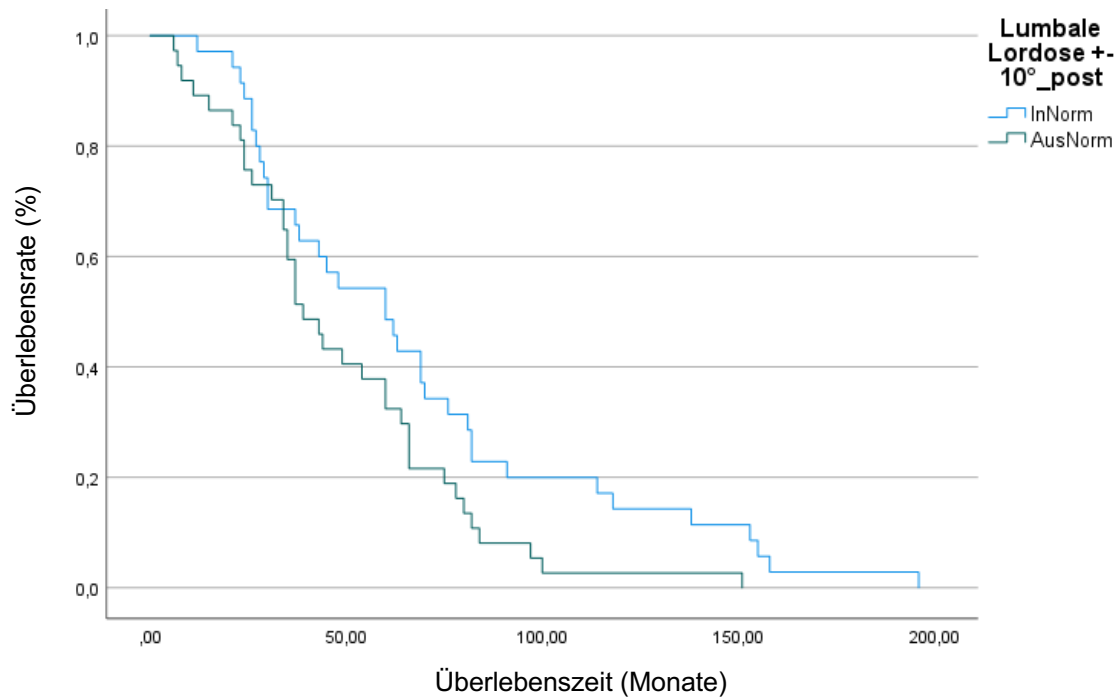


Abbildung 26: Überlebenskurve in Abhängigkeit der Differenz PI-LL

Tabelle 3 verdeutlicht den Einfluss von der lumbalen Lordose, der ‚Pelvic Incidence‘ sowie den Einschluss von S1 in die Fusion, auf die Überlebenszeit.

Tabelle 3: Einfluss klinischer Parameter auf die Überlebenszeit

	Lumbale Lordose L1/L5		Pelvic Incidence		Einschluss S1 in Fusion	
	Prae OP	Post OP	Prae OP	Post OP	Ja	Nein
<45 Monate	43,01°	42,92°	59,47°	61,83°	n=18	n=16
>45 Monate	50,23°	46,58°	64,18°	61,06°	n=21	n=14

Bei Patienten, welche eine Überlebenszeit von <45 Monaten aufwiesen (n=33), lag die durchschnittliche, präoperative lumbale Lordose bei 43,01°. Studienteilnehmer mit einer Überlebenszeit von >45 Monaten (n=34) hingegen zeigten durchschnittlich eine mittlere, präoperative lumbale Lordose von 50,23°

(Abbildung 27). Die statistische Auswertung ergab eine signifikant positive Korrelation für den Faktor der präoperativen lumbalen Lordose mit der Zeitspanne zwischen den Eingriffen ( $r=0,31$ ;  $p=0,011$ ). Postoperativ lag die durchschnittliche lumbale Lordose bei Patienten mit <45 Monaten Überlebenszeit ( $n=33$ ) bei  $42,92^\circ$  und bei Patienten mit >45 Monaten ( $n=34$ ) bei  $46,58^\circ$ . Auch an dieser Stelle ergibt sich eine signifikant positive Korrelation zwischen dem Faktor der postoperativen lumbalen Lordose und der Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff ( $r=0,43$ ,  $p<0,001$ ).

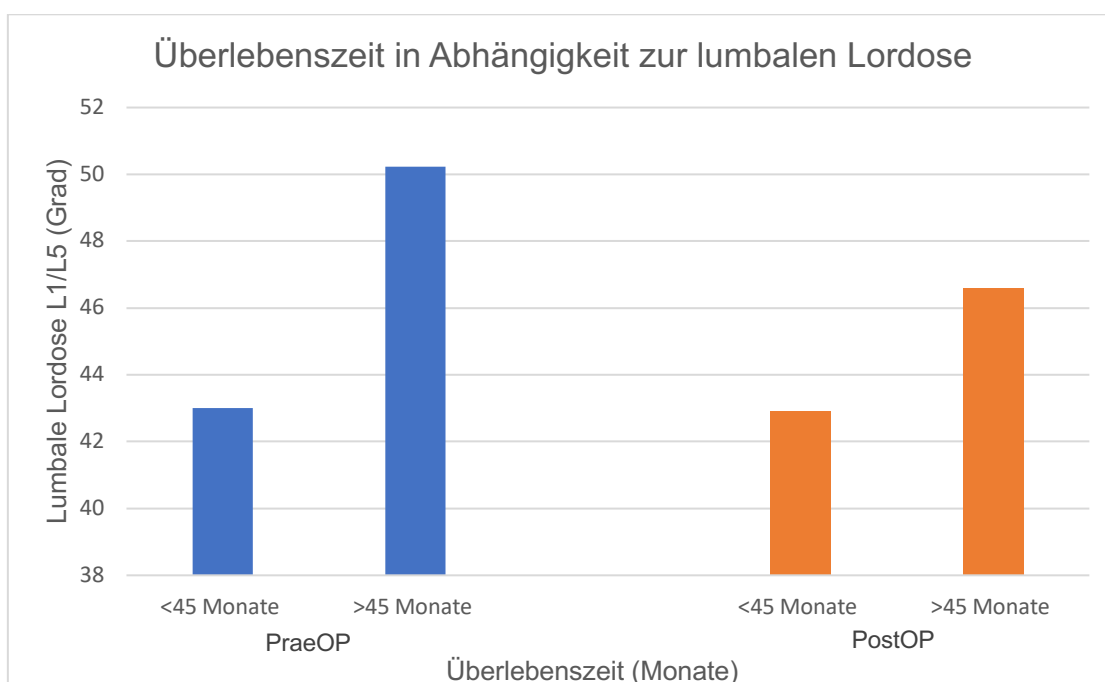


Abbildung 27: Überlebenszeit in Korrelation zur lumbalen Lordose

Studienteilnehmer mit einer Überlebenszeit von <45 Monaten zeigten eine durchschnittliche präoperative ‚Pelvic Incidence‘ von  $59,47^\circ$  und Patienten mit einer Überlebenszeit von >45 Monaten wiesen eine durchschnittliche präoperative ‚Pelvic Incidence‘ von  $64,18^\circ$  auf. Postoperativ lag die durchschnittliche ‚Pelvic Incidence‘ bei  $61,83^\circ$  bei Patienten mit <45 Monaten Überlebenszeit und bei  $61,06^\circ$  bei Patienten mit >45 Monaten Überlebenszeit (Abbildung 28).

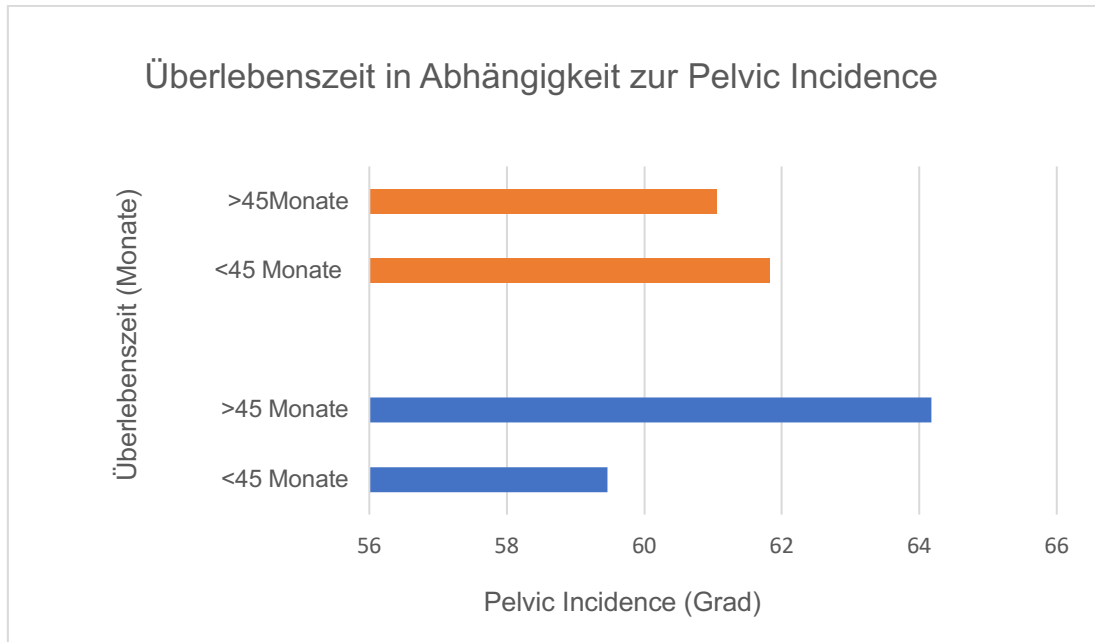


Abbildung 28: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur ‚Pelvic Incidence‘

Die statistischen Auswertungen ergaben an dieser Stelle keine Signifikanz hinsichtlich des Einflusses der ‚Pelvic Incidence‘ auf die Überlebenszeit.

Weiterführend ist in Abbildung 29 die Überlebenszeit zwischen beiden Eingriffen in Bezug auf die Inklusion von Wirbelkörper S1 dargestellt. N=18 Studienteilnehmer, bei denen S1 mit in die Fusion aufgenommen wurde, zeigten eine Überlebenszeit von <45 Monaten, wohingegen n=21 Patienten mit Inklusion von S1 eine Überlebenszeit von >45 Monaten aufwiesen. Demgegenüber kam es bei den Patienten, bei welchen keine Inklusion von S1 stattgefunden hat, bei n=16 Patienten zu einer Überlebenszeit von <45 Monaten und bei n=14 Patienten von >45 Monaten zwischen Initial- und Revisionseingriff.

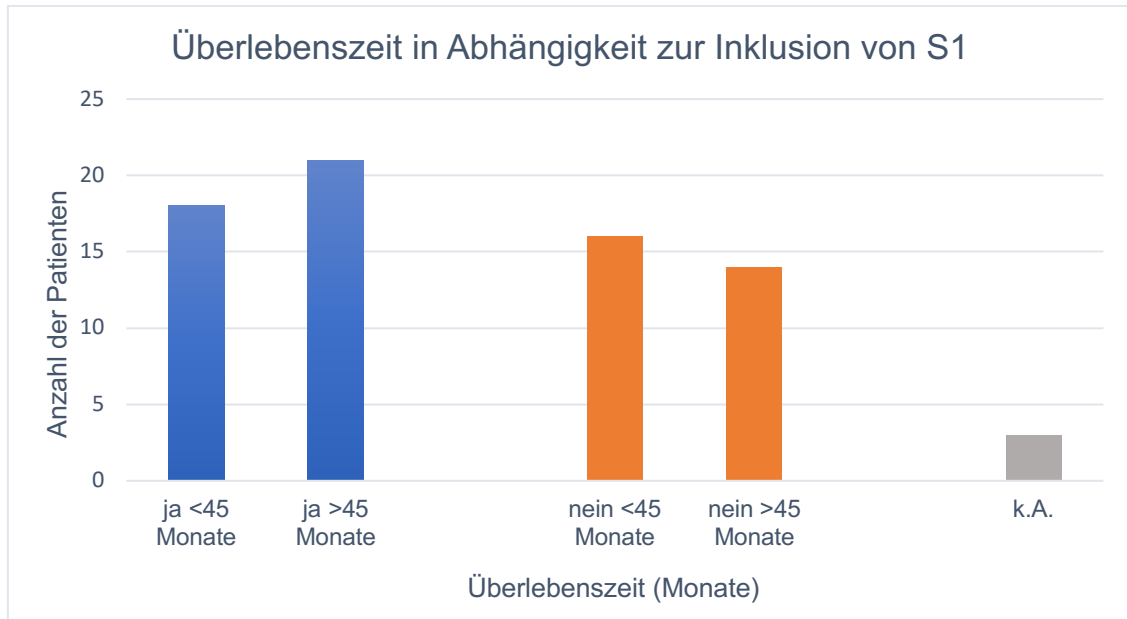


Abbildung 29: Überlebenszeit in Abhängigkeit zur Inklusion von S1

### 3.5 Ergebnisüberblick

In der Analyse der demographischen Faktoren zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration und dem Geschlecht oder dem Body-Mass-Index (BMI) der Patienten. Bemerkenswert war jedoch, dass 72,2% der Patienten (n=52) weiblich waren und 70,83% (n=51) Übergewicht oder leichtes Übergewicht aufwiesen. Zwischen dem Alter der Studienteilnehmer und der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration wurde eine signifikant negative Korrelation festgestellt ( $r=-0,26$ ;  $p=0,03$ ). Insgesamt waren 19,44% (n=14) der Patienten zum Zeitpunkt des Initialeingriffes zwischen 20 und 49 Jahre alt, während 80,56% (n=58) zwischen 50 und 89 Jahre alt waren.

Betrachtet man die radiologischen Faktoren, so ergab die Untersuchung keine statistische Signifikanz zwischen der zeitlichen Entwicklung degenerativer Veränderungen in den Anschlusssegmenten und den präoperativen Werten von ‚Pelvic Tilt‘ und ‚Pelvic Incidence‘. Eine signifikant positive Korrelation zeigte sich jedoch zwischen der präoperativen lumbalen Lordose und der Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff ( $r=0,31$ ;  $p=0,011$ ). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine größere präoperative lumbale Lordose mit einer kürzeren

Zeitspanne zwischen den beiden Eingriffen einhergeht. Bei Patienten mit einer Überlebenszeit von weniger als 45 Monaten (n=33) betrug die durchschnittliche präoperative lumbale Lordose 43,01°, während bei Patienten mit einer Überlebenszeit von >45 Monaten (n=34) eine durchschnittliche präoperative lumbale Lordose von 50,23° gemessen wurde.

Die Untersuchung der operativen Faktoren ergab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Zeitspanne zwischen den beiden Eingriffen und der Fusionslänge oder der Inklusion von Wirbelkörper S1. Jedoch war die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils von hoher Bedeutung für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration.

Patienten mit einer normwertigen postoperativen Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose respektive mit einer sagittalen Balance im Bereich der Lendenwirbelsäule, wiesen eine deutlich längere Zeitspanne zwischen den Operationen auf (68,1 Monate, n=35) als Patienten (48,7 Monate, n=37), welche außerhalb der Norm lagen ( $\text{Chi}^2=4,39$ ;  $p=0,036$ ). Eine signifikant positive Korrelation wurde zwischen der intraoperativen Zunahme der lumbalen Lordose und der Zeitspanne zwischen den beiden Operationen festgestellt ( $r=0,43$ ;  $p<0,001$ ). Patienten, welche eine normwertige Differenz zwischen Pelvic Incidence und lumbaler Lordose ( $\pm 10^\circ$ ) und somit eine sagittale Balance im Bereich der Lendenwirbelsäule aufwiesen, zeigten zudem einen signifikant längeren Zeitraum (M=68,1 Monate) vom initialen zum Revisionseingriff als Patienten mit einer nicht-normwertigen Differenz und somit einer sagittalen Imbalance (M=48,7 Monate;  $\text{Chi}^2=4,39$ ;  $p=0,036$ ).

## 4. Diskussion

Im Fokus dieser Untersuchung steht die Erhebung von Risikofaktoren zum Entstehen einer Anschlussdegeneration. Doch ist die Anschlussdegeneration überhaupt unvermeidlich? Ehni (1981, S.1) stellte die folgende These auf: „Fusion generates a conflict between immediate benefit and late consequences“.

Das Fehlen einer evidenzbasierten Leitlinie sowie einer einheitlichen Terminologie in Bezug auf den Umgang mit Anschlussdegenerationen erschwert eine optimale Behandlung dieser Komplikation (Bredow et al., 2022). Aufgrund dessen werden im Folgenden die zuvor beschriebenen Ergebnisse umfassend diskutiert. Es wird dabei auf die demographischen, radiologischen und operativen Faktoren eingegangen, um ein tieferes Verständnis der Mechanismen und Risikofaktoren für diese schmerzbringende Komplikation zu entwickeln und potenzielle präventive Maßnahmen zu identifizieren. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils der Lendenwirbelsäule gelegt. Die Ergebnisse werden im Kontext der aktuellen Literatur diskutiert und durch wissenschaftliche Quellen untermauert.

### 4.1 Demographische Faktoren

Die Auswertung der Ergebnisse ergab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration und dem Geschlecht sowie dem BMI der Patienten. Bemerkenswert war jedoch, dass der Großteil des Studienkollektivs weiblich war (72,2%) und einen hohen Anteil an Übergewicht oder leichtem Übergewicht aufwies (70,83%). Diese Beobachtungen legen nahe, dass das weibliche Geschlecht sowie ein höherer BMI nicht direkt die Entstehung einer Anschlussdegeneration bedingen, jedoch indirekt mit dieser assoziiert sein könnten. Diese Annahme ist darauf zurück zu führen, dass in der vorliegenden Studie ein deutlich höherer Anteil dieser beiden Patientengruppen von degenerativen Veränderungen im Bereich der Lendenwirbelsäule betroffen ist. In einer italienischen Studie konnte ebenso kein signifikanter Zusammenhang

zwischen der Entwicklung einer Anschlussdegeneration und dem Geschlecht der Patienten ermittelt werden (de la Garza-Ramos et al., 2018). Aus einer Untersuchung möglicher Risikofaktoren für Lendenwirbelsäulendegenerationen anhand von Medicare-Daten ging hervor, dass weibliche Patienten häufiger von diesen Krankheitsbildern betroffen sind als Männer (Parenteau et al., 2021). Zudem zeigen Frauen tendenziell schwerwiegendere degenerative Veränderungen im Bereich der Lendenwirbelsäule als männliche Patienten (Asai et al., 2022; Wang et al., 2011). Diese Aussagen decken sich mit den Ergebnissen dieser Studie und zeigen eine mögliche indirekte Assoziation des Geschlechts, mit der Anschlussdegeneration. In Bezug auf den direkten Einfluss des Geschlechts auf die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration gibt es aktuell wenig seriöse Literatur.

In vorherigen Studien wurde ein Zusammenhang zwischen dem Übergewicht, gemessen anhand des BMI, und der Degeneration von Bandscheiben untersucht. Böstman (1994) dokumentierte bei stationären Behandlungen von Bandscheibenvorfällen eine Prävalenz von 27% der Patienten mit Fettleibigkeit, wohingegen der Gesamtanteil von Übergewichtigen in der allgemeinen Bevölkerung lediglich 16% betrug. Eine finnische Studie konnte zeigen, dass sich das Risiko für eine stationäre Behandlung von Bandscheibenerkrankungen bei einem BMI von über 27,5 kg/m<sup>2</sup> mehr als verdoppelt (Kaila-Kangas et al., 2003). Besonders signifikant war dieser Zusammenhang bei einer erhöhten Taillen-Hüft-Rate, die mit einer vermehrten Ansammlung von abdominellem Fett einhergeht, welches oberhalb der betroffenen Bandscheibe lokalisiert ist und somit biomechanisch relevant wird (Han et al., 1997). Cannizzaro et al. (2023) identifizierten in ihrer systematischen Überprüfung und Metaanalyse eine Fettleibigkeit sowie ein höheres Alter als relevante Risikofaktoren für die Entwicklung von degenerativen Veränderungen in den angrenzenden Segmenten an die Fusionsstrecke.

In der vorliegenden Studie wurde eine signifikant negative Korrelation zwischen dem Alter der Patienten und der Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff festgestellt ( $r=-0,26$ ;  $p=0,03$ ). Ältere Patienten zeigen demnach

ein höheres Risiko für ein frühzeitiges Eintreten einer Anschlussdegeneration. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen von internationalen Studien überein, in denen ebenfalls festgestellt wurde, dass ein höheres Alter mit einem erhöhten Risiko von postoperativen Komplikationen einhergeht (Khan et al., 2020; Verla et al., 2016). In der Studie von de la Garza-Ramos (2018) wurde anhand einer Risikofaktorenanalyse das zunehmende Alter als einziger signifikanter Faktor, welcher mit der Anschlussdegeneration im Bereich der Lendenwirbelsäule assoziiert ist, ermittelt und stützt gleichermaßen die Ergebnisse der vorliegenden Studie.

Darüber hinaus konnten in anderen Studien demographische Faktoren ermittelt werden, welche eine Anschlussdegeneration nicht zwingend direkt bedingen, jedoch potenzielle Risikofaktoren für degenerative Veränderungen der Wirbelsäule darstellen können. Das Rauchen wird hinsichtlich seiner Auswirkungen auf den Körper, aufgrund des häufigeren Hustens, frühzeitiger Osteoporose und einhergehender Vasokonstriktion, als ein Risikofaktor für Bandscheibendegenerationen angesehen (Kaila-Kangas et al., 2003). Schwere Belastungen der Wirbelsäule, insbesondere durch berufliche Exposition, werden ebenfalls als Risikofaktoren für Wirbelsäulendegenerationen gesehen. Während einige Studien diesen Zusammenhang zwischen beruflichen Belastungen und Bandscheibenerkrankungen nachweisen konnten (Elfering et al., 2002; Jang et al., 2016), gibt es auch Studien, welche diesen Zusammenhang nicht bestätigen konnten (Battié et al., 2004).

## 4.2 Radiologische Faktoren

Es wurden in der Vergangenheit bereits einige radiologisch nachweisbare Risikofaktoren für die Entwicklung einer Anschlussdegeneration identifiziert. Hierzu gehören beispielsweise eine verkleinerte präoperative Lendenlordose sowie eine verkleinerte angrenzende Bandscheibenhöhe (Liang et al., 2014). Der grundsätzliche Erhalt sowie die Wiederherstellung des sagittalen Profils der Lendenwirbelsäule stellen ein fundamentales Ziel in der

Lendenwirbelsäulenchirurgie dar (Ferraris et al., 2012). Eine Reduktion der sagittalen Krümmung der Wirbelsäule, infolge einer dorsalen Spondylodese, erhöht die Wahrscheinlichkeit eines segmentalen Zusammenbruchs, sowohl oberhalb als auch unterhalb des Versteifungsniveaus. Im schlimmsten Fall kann ein erhebliches sagittales Ungleichgewicht zu einem fortschreitenden Versagen der dynamischen und statischen Stabilisatoren der Wirbelsäule führen, was wiederum Schmerzen und Funktionseinschränkungen für den Patienten zur Folge hat (Gödde et al., 2003). Aus diesem Grund sind radiologische Parameter wie die lumbale Lordose, die ‚Pelvic Incidence‘ und der ‚Pelvic Tilt‘ von großer Bedeutung für die Bewertung der postoperativen Ergebnisse.

Die Untersuchung von relevanten, radiologischen Faktoren im Zuge dieser Studie ergab keine statistische Signifikanz zwischen der zeitlichen Entwicklung degenerativer Veränderungen in den Anschlusssegmenten und den präoperativen Werten von ‚Pelvic Tilt‘ und ‚Pelvic Incidence‘. Andere Studien dagegen identifizierten eine hohe ‚Pelvic Incidence‘ (Rothenfluh et al., 2015) und einen erhöhten ‚Pelvic Tilt‘ (Matsumoto et al., 2017) als Risikofaktoren für eine Anschlussdegeneration. Grundsätzlich sind die ‚Pelvic Incidence‘ und der ‚Pelvic Tilt‘ entscheidende radiologische Parameter, die zur Beurteilung der spinopelvinen Balance dienen. Aufgrunddessen werden diese Parameter häufig von diversen Studien zur Beurteilung des Fusionsergebnisses und darüber hinaus als Maß für den patientenspezifischen Kompensationsmechanismus herangezogen (Kumar et al., 2001; Shin et al., 2013; Lazennec et al., 2000). Dieser Kompensationsmechanismus kann, aufgrund einer Anteflexion des Rumpfes, verursacht durch einen Verlust der lumbalen Lordose durch degenerative oder traumatische Prozesse, ausgelöst werden. Dies stellt sich beispielsweise in Form einer Retroversion des Beckens dar, um eine erneute physiologische Körperhaltung zu erzielen, was wiederum den ‚Pelvic Tilt‘ vergrößert (Grohs & Urach, 2019). Aufgrunddessen ist ein vergrößerter ‚Pelvic Tilt‘ ein Zeichen für eine Fehlstellung der Wirbelsäule. Durch verschiedene Untersuchungen wurden für den ‚Pelvic Tilt‘ Normwerte von 12° bei Männern und 10° bei Frauen identifiziert (Legaye et al., 1998; Le Huec und Hasegawa, 2016). Anhand einiger aktueller Studien konnte nachgewiesen werden, dass sich ein

kleiner ‚Pelvic Tilt‘, respektive die Reduktion des ‚Pelvic Tilts‘, positiv auf die Entwicklung einer Anschlussdegeneration auswirken kann (Lafage et al., 2009; Shin et al., 2013; Kim et al., 2011). Diese Beobachtungen legen nahe, dass intraoperativ versucht werden sollte, einen kleineren ‚Pelvic Tilt‘ mit einem Wert von unter 20° herzustellen (Schwab et al., 2010).

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der präoperativen lumbalen Lordose mit der Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff ergab sich im Rahmen dieser Studie eine signifikant positive Korrelation ( $r=0,31$ ;  $p=0,011$ ). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine verkleinerte präoperative lumbale Lordose mit einer verkürzten Zeitspanne zwischen den beiden Eingriffen einhergeht. Vorherige Studien kamen zu ähnlichen Ergebnissen und stellten ebenfalls fest, dass eine verminderte präoperative lumbale Lordose eine Prädisposition für Erkrankungen der angrenzenden Segmente zu sein scheint (Rothenfluh et al. 2015; Matsumoto et al., 2017).

Die zuvor analysierten radiologischen Befunde dieser Studie, deuten darauf hin, dass die intraoperative Verwendung eines lordotischen Cages eine signifikant verbesserte Lordose in der Region der Lendenwirbelsäule schafft. Darüber hinaus ist es von entscheidender Bedeutung, die Ausrichtung der Lendensegmente im sagittalen Profil der Lendenwirbelsäule, sowie deren Ausrichtung in Bezug auf die Lage des Becken, zu evaluieren. Diese umfassende Beurteilung ist notwendig, um durch ein intraoperativ optimal ausgerichtetes sagittales Lendenwirbelsäulenprofil, das bestmögliche postoperative Ergebnis zu erreichen.

### 4.3 Operative Faktoren

Zu Beginn der Untersuchung vermuteten wir einen Zusammenhang zwischen der intraoperativ hergestellten Fusionstrecke respektive der Anzahl der fusionierten Segmente und der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration. Unsere Ergebnisse ergaben jedoch keine statistische Signifikanz für diese Faktoren. De la Garza-Ramos et al. (2018) konnten ebenso keinen signifikanten

Zusammenhang zwischen der Anzahl der fusionierten Segmente und der zeitlichen Entwicklung der Anschlussdegeneration ermitteln. Andere Studien erhielten hingegen konträre Ergebnisse und konnten einen signifikanten Zusammenhang feststellen. So konnten Okuda et al. (2018) sowie Burch et al. (2020) untersuchen, dass eine verlängerte Fusionsstrecke mit der Häufigkeit des Auftretens einer Anschlussdegeneration korreliert.

Ein weiterer Aspekt dieser Studie war die Untersuchung der Inklusion von S1 in die Fusion während der Initialoperation. Bei 54% der Studienteilnehmer (n=39) wurde S1 inkludiert, während dies bei 42% (n=30) nicht der Fall war. Für 4% der Patienten (n=3) lagen diesbezüglich keine zuverlässig auswertbaren, präoperativen Röntgenbilder vor. Bei der Korrelation von der Inklusion von S1 in die Fusion mit der Überlebenszeit zeigte sich, dass Patienten mit inkludiertem Wirbelkörper S1 eine durchschnittliche Überlebenszeit von 60,69 Monaten bis zum Auftreten einer Anschlussdegeneration zeigen. Patienten ohne inkludierten Wirbelkörper S1 wiesen hingegen eine durchschnittliche Überlebenszeit von 54,5 Monaten auf. Trotz dieser Unterschiede ergab die statistische Auswertung keine signifikante Korrelation zwischen der Inklusion von S1 in die Fusion und der Überlebenszeit bis zur Anschlussdegeneration. Die Inklusion von S1 hatte somit in dieser Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf die Überlebenszeit. Im Gegensatz dazu, haben andere Studien einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Inklusion von S1 und der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration ermitteln können (Bydon et al., 2014). Patienten mit inkludiertem Wirbelkörper S1 zeigen eine höhere Wahrscheinlichkeit im Laufe der Zeit an einer Anschlussdegeneration zu erkranken als Patienten ohne Inklusion von S1 (ebd.).

Die Zeit zwischen Initial- und Revisionseingriff in der Gesamtkohorte der vorliegenden Studie betrug durchschnittlich 58,12 Monate (4,84 Jahre), mit einem Median von 44,5 Monaten. In anderen Studien wurde hingegen eine durchschnittliche Zeit von 5,9 Jahren (Sato et al., 2015) bzw. von 6,5 Jahren (Screven et al., 2021) bis zum Eintreten der Anschlussdegeneration ermittelt. Im Vergleich mit internationalen Studien ist festzustellen, dass es bei den Patienten

der vorliegenden Studie schneller zum Eintreten der Anschlussdegeneration kam. An dieser Stelle wäre für weitere Forschungsarbeiten interessant zu untersuchen, ob auch die Faktoren Genetik und Herkunft einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Anschlussdegeneration nehmen können.

Anschließend wurde die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils der Lendenwirbelsäule untersucht. Beträgt die Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose  $\pm 10^\circ$ , so spricht man von einer sagittalen Balance im Bereich der Lendenwirbelsäule. Liegt diese Differenz jedoch außerhalb dieser Spannweite, so spricht man von einer sagittalen Imbalance (Zhu et al., 2015). In unserer Studie zeigte sich, dass Patienten mit einer postoperativ normwertigen Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose eine signifikant längere Überlebenszeit aufwiesen (68,1 Monate) im Vergleich zu Patienten mit einer nicht normwertigen Differenz (48,7 Monate;  $\text{Chi}^2=4,39$ ;  $p=0,036$ ). Diese Ergebnisse betonen die Bedeutung der intraoperativen Herstellung einer sagittalen Balance, um eine zufriedenstellende Langzeitprognose nach einer lumbalen Fusion zu erreichen. Unsere Untersuchung deckt sich mit den Ergebnissen von weiteren internationalen Studien. Rothenfluh et al. (2015) konnten in ihrer Kohorte feststellen, dass 78,3% der Patienten mit postoperativer sagittaler Imbalance eine Revisionsoperation benötigten und bei nur 25,5% der Patienten mit sagittaler Balance eine Revisionsoperation notwendig wurde. Senteler et al. (2014) identifizierten höhere Scherkräfte in den Nachbarsegmenten einer Fusion als mechanische Erklärung für die klinische Korrelation zwischen der Differenz von ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose mit der Entwicklung einer Anschlussdegeneration. Kim et al. (2019) und Yoon et al. (2023) kamen zu ähnlichen Ergebnissen und konnten feststellen, dass Patienten mit einer nicht-normwertigen postoperativen Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose häufiger eine Anschlussdegeneration entwickelten, als Patienten mit einer normwertigen postoperativen Differenz. Bei Patienten mit einer Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose von  $>15^\circ$  wurde sogar von einem 20-fach erhöhtem Risiko für eine Anschlussdegeneration berichtet (Senteler et al., 2014). Unsere Ergebnisse sowie die Ergebnisse internationaler Studien lassen vermuten, dass eine

postoperative sagittale Imbalance im Bereich der Lendenwirbelsäule einen starken Risikofaktor für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration darstellt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen außerdem, dass eine größere postoperative lumbale Lordose mit einer längeren Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionseingriff einhergeht. Dagegen wiesen Patienten mit einer verkleinerten postoperativen lumbalen Lordose eine deutlich kürzere Zeitspanne zwischen beiden Eingriffen auf. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Untersuchungen von Wang et al. (2020) und Dallaudiere et al. (2020), welche eine positive Korrelation zwischen einer ausgeprägten lumbalen Lordose und einer verbesserten Langzeitprognose nachweisen konnten. Wang et al. (2020) stellten zudem fest, dass bei Patienten, welche älter als 60 Jahre alt waren, die Inzidenz für eine Anschlussdegeneration höher war, wenn der Korrekturwinkel der lumbalen Lordose  $>10^\circ$  war. Andere internationale Studien konnten jedoch keinen Zusammenhang zwischen der lumbalen Lordose und der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration ermitteln (Kim et al., 2019; Toivonen et al., 2022). Toivonen et al. (2022) stellten zudem fest, dass eine höhere lumbale Lordose außerhalb des Fusionssegments das Risiko für das Auftreten einer Anschlussdegeneration verringert.

Unsere Ergebnisse zeigen keine signifikante Korrelation zwischen der postoperativen ‚Pelvic Incidence‘ und der Zeitspanne zwischen Initial- und Revisionsoperation. Dies steht im Einklang mit vielen anderen internationalen Studien, die ebenfalls keinen signifikanten Zusammenhang zwischen diesen Parametern feststellen konnten (Kim et al., 2019; Yamasaki et al., 2017; Zheng et al., 2020). Daraus lässt sich schließen, dass die ‚Pelvic Incidence‘ als alleiniger Faktor, keinen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung einer Anschlussdegeneration im Bereich der Lendenwirbelsäule zu nehmen scheint. Jedoch ist die ‚Pelvic Incidence‘ im Verhältnis zur lumbalen Lordose zu betrachten, um die sagittale Balance bzw. Imbalance beurteilen zu können, welche einen erheblichen Einfluss auf die Langzeitprognose zu haben scheint.

In einer vorherigen Studie der Universität Tübingen wurde zudem in einer Langzeitnachbeobachtung der Operationserfolg hinsichtlich des verwendeten Cage-Designs untersucht (Walter et al., 2021). So wurde ein Vergleich zwischen lordotischen und nicht-lordotischen transforaminalen, lumbalen, interkorporellen Fusions-(TLIF)-Cages in der degenerativen Lendenwirbelsäulen Chirurgie gezogen. Walter et al. (2021) kamen in ihrer Analyse zu dem Schluss, dass das Cage-Design in Form eines lordotischen Cages, die lumbale Lordose vergrößert, während diese bei Patienten mit nicht-lordotischem Cage kleiner wurde, dies jedoch keinen Einfluss auf den langfristigen Operationserfolg nimmt. Viel mehr beeinflussen Faktoren wie die richtige Indikation und eine ausreichende Dekompression die Langzeitprognose (ebd.). Im Vergleich zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie ist festzustellen, dass eine größere lumbale Lordose hier sehr wohl mit einer besseren Langzeitprognose einhergeht.

#### 4.4 Limitationen

Die Limitationen dieser Studie liegen vor allem in der relativ kleinen Stichprobengröße, was die Aussagekraft und die Möglichkeit, statistisch signifikante Zusammenhänge zu identifizieren, limitiert. Die Größe der Stichprobe beeinflusst auch die Möglichkeit, Subgruppenanalysen durchzuführen, die hilfreich wären, um spezifische Risikofaktoren in unterschiedlichen Patientengruppen zu identifizieren. Eine weitere Limitation stellt der Operateur bzw. die Erfahrung des Operateurs dar. So können unterschiedliche Operateure, mit abweichenden Erfahrungen, auf das Operationsergebnis sowie auf die Langzeitprognose Einfluss nehmen. Laut Lee et al. (2014) ist bei einer technisch anspruchsvollen Operationstechnik ein Lernerfolg zu erwarten. Somit hat die steigende Erfahrung des Operateurs möglicherweise einen positiven Einfluss auf die intraoperative Wiederherstellung des sagittalen Profils der Wirbelsäule bei später operierten Patienten. Zudem liegen die Limitationen in der retrospektiven Natur der Analyse, da hier in Hinblick auf die Fragestellung lediglich Hypothesen gestärkt werden können.

Interessant für zukünftige Studien wären prospektive Designs mit einer größeren Stichprobe um die hier identifizierten Zusammenhänge weiter zu validieren.

## 4.5 Schlussfolgerung

Die in dieser Studie erhobenen Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer präzisen präoperativen Planung und intraoperativen Umsetzung, insbesondere in Hinblick auf die Gestaltung des sagittalen Profils, um das Risiko einer Anschlussdegeneration zu minimieren. Es sollte bei posterioren, lumbalen Fusionen versucht werden, die lumbale Lordose zu vergrößern. Kann durch den Eingriff eine physiologische Lordose erreicht werden, verlängert sich die Zeitspanne bis zu einem möglichen Revisionseingriff. Zudem sollte versucht werden, eine sagittale Balance im Bereich der Lendenwirbelsäule einzustellen, indem eine Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose von  $\pm 10^\circ$  angestrebt wird, wodurch ebenfalls eine längere Zeitspanne zwischen Initial- und möglicher Revisionsoperation erreicht werden kann. Darüber hinaus wurden in dieser Studie ein höheres Alter und eine verkleinerte präoperative lumbale Lordose als Risikofaktoren für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration identifiziert. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration und dem Geschlecht oder dem BMI der Patienten. Bemerkenswert war jedoch, dass 72,2% der Patienten (n=52) weiblich waren und 70,83% (n=51) Übergewicht oder leichtes Übergewicht aufwiesen. Diese Beobachtungen legen nahe, dass das weibliche Geschlecht sowie ein höherer BMI nicht direkt die Entstehung einer Anschlussdegeneration bedingen, jedoch indirekt mit der Anschlussdegeneration assoziiert sein könnten, da diese Personengruppen häufiger von degenerativen Veränderungen im Bereich der Wirbelsäule betroffen sind. Weiterführende Forschung ist notwendig, um diese Erkenntnisse zu vertiefen und optimale vorbeugende sowie chirurgische Strategien für bessere Langzeitprognosen zu entwickeln.

## 5. Zusammenfassung

Die Anschlussdegeneration ist eine bereits bekannte und schwerwiegende degenerative Veränderung an den beweglichen Anschlusssegmenten, welche vermehrt nach dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule zu beobachten ist. Vorherige Forschungsergebnisse diverser Studien konnten bereits eine Reihe von Risikofaktoren für das Entstehen einer Anschlussdegeneration identifizieren. Das Ziel dieser Studie ist es, bei Patienten, welche eine Anschlusspondylodese erhalten haben, demographische, radiologische und operative Einflussfaktoren zu untersuchen, welche einen prädiktiven Wert für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration besitzen. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Analyse der sagittalen Imbalance und auf die intra- und postoperative Änderung des sagittalen Wirbelsäulenprofils gelegt. Schlussfolgernd sollen die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen, das Risiko der Entstehung einer Anschlussdegeneration zu senken, respektive den Zeitraum bis zur Entwicklung dieser postoperativen, degenerativen Komplikation in den Anschlusssegmenten nach Möglichkeit auszudehnen. Die Arbeitshypothese dieser Arbeit lautet: Entscheidende positive Risikofaktoren für die Entstehung einer Anschlussdegeneration sind das Alter, BMI/Körpergewicht sowie das Geschlecht der Patienten. Zudem nimmt die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils Einfluss auf die Zeitspanne zwischen Fusionsoperation und Revisionseingriff.

Insgesamt wurden n=72 Patienten und Patientinnen in die vorliegende, retrospektive Studie aufgenommen, welche in der Universitätsklinik für Orthopädie in Tübingen zwischen 2003 und 2018 (Initialeingriff) behandelt wurden. Es wurden ausschließlich Patienten ausgewählt, bei denen mindestens zwei Eingriffe durchgeführt wurden: Eine initiale dorsale Fusion der Lendenwirbelsäule und mindestens ein Revisionseingriff, welcher zu einer Verlängerung der bereits zuvor fusionierten Strecke führte. Zudem wurden in der Studie nur Patienten berücksichtigt, bei welchen degenerative Veränderungen der Anschlusssegmente ursächlich für den Revisionseingriff waren. Für diese Patienten wurde mittels Microsoft Excel ein Datensatz angelegt und personenbezogene Informationen wie Geburtsdatum, Geschlecht, Größe,

Gewicht und BMI erfasst. Außerdem wurde anhand der Daten der Zeitraum zwischen Initial- und Revisionseingriff bestimmt. Anschließend wurden pro Patient jeweils 3 konventionelle Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule in der Sagittalen, mithilfe eines zuvor erstellten Auswertungsskriptes, vermessen. Hierbei handelte es sich um Aufnahmen von vor dem Initialeingriff, unmittelbar nach dem Initialeingriff und kurz vor dem Revisionseingriff. Das Ziel hierbei war es, die degenerativen Veränderungen, welche zwischen Initial- und Revisionseingriff entstanden sind, zu erfassen und das sagittale Wirbelsäulenprofil zu beurteilen.

In der Analyse der demographischen Faktoren korrelierte das Alter signifikant negativ mit der Zeitspanne zwischen den Eingriffen ( $r=-0,26$ ;  $p=0,03$ ). Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der zeitlichen Entwicklung einer Anschlussdegeneration und dem Geschlecht oder dem BMI der Patienten. Bemerkenswert war jedoch, dass 72,2% der Patienten ( $n=52$ ) weiblich waren und 70,83% ( $n=51$ ) Übergewicht oder leichtes Übergewicht aufwiesen. Bei den präoperativen Faktoren zeigte sich eine signifikante positive Korrelation für den Faktor der lumbalen Lordose ( $r=0,31$ ;  $p=0,011$ ). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine größere präoperative lumbale Lordose mit einer längeren Zeitspanne zwischen den beiden Eingriffen einhergeht. Bezogen auf die postoperativen Faktoren zeigte sich ebenfalls eine signifikant positive Korrelation zwischen der intraoperativen Zunahme der lumbalen Lordose mit der Zeitspanne zwischen den Eingriffen ( $r=0,43$ ;  $p<0,001$ ). Patienten mit normwertiger postoperativer Differenz zwischen ‚Pelvic Incidence‘ und lumbaler Lordose ( $\pm 10^\circ$ ) zeigten zudem eine längere Zeitspanne ( $M=68,1$  Monate) zwischen Initial- und Revisionseingriff als Patienten mit nicht-normwertiger lumbaler Lordose ( $M=48,7$  Monate;  $t(70)=2,07$ ;  $p=0,04$ ). Anhand dieser Ergebnisse lässt sich die zuvor gestellte Arbeitshypothese nur teilweise bestätigen. Während das Geschlecht und Gewicht/BMI der Patienten die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration nicht bedingen, sind das Alter und vor allem die intraoperative Gestaltung des sagittalen Profils der Lendenwirbelsäule von entscheidender Bedeutung.

Unseres Wissens ist die vorliegende Arbeit, die erste Studie, die ausschließlich Patienten nach Anschlusspondylodese bei Anschlussdegeneration einschließt, um potentiell prädiktive Faktoren für die zeitliche Entwicklung einer Anschlussdegeneration zu identifizieren. Innerhalb dieses Patientenkollektivs war die sagittale Balance von hoher Bedeutsamkeit. Eine größere lumbale Lordose vor dem initialen Eingriff ging mit einer verlängerten Zeitspanne bis zum Revisionseingriff einher. Dementsprechend wiesen Patienten mit einer früh einsetzenden Anschlussdegeneration bereits vor der initialen Operation eine reduzierte lumbale Lordose auf. Zusätzlich korreliert eine operationsbedingte Zunahme der lumbalen Lordose mit einer Zunahme der Zeitspanne bis zum Revisionseingriff. Zusammenfassend sollte bei posterioren lumbalen Fusionen versucht werden, die lumbale Lordose zu vergrößern. Kann durch den Eingriff eine physiologische Lordose erreicht werden, verlängert sich die Zeitspanne bis zum Revisionseingriff.

## 6. Literaturverzeichnis

Achar, S., & Yamanaka, J. (2019). Apophysitis and osteochondrosis: common causes of pain in growing bones. *American family physician*, 99(10), 610-618.

Angevine, P. D., & McCormick, P. C. (2007). The importance of sagittal balance: how good is the evidence? *Journal of Neurosurgery: Spine*, 6(2), 101-103.

Asai, T., Sakuma, E., Mizutani, T., Ishizaka, Y., Ori, K., & Ueki, T. (2022). Sex- and Age-related Differences in Spinal Degeneration: An Anatomical and Magnetic Resonance Imaging Study of the Human Spine. *Prog Rehabil Med*, 7, 20220011. <https://doi.org/10.2490/prm.20220011>

Aumüller, G., Aust, G., Conrad, A., Engele, J., Kirsch, J., Maio, G., Mayerhofer, A., Mense, S., Reißig, D., & Salvetter, J. (2020). *Duale Reihe Anatomie* (Vol. 1). Thieme Stuttgart.

Bae, T. S., & Mun, M. (2010). Effect of lumbar lordotic angle on lumbosacral joint during isokinetic exercise: a simulation study. *Clinical Biomechanics*, 25(7), 628-635.

Battié, M. C., Videman, T., & Parent, E. (2004). Lumbar disc degeneration: epidemiology and genetic influences. *Spine*, 29(23), 2679-2690. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000146457.83240.eb>

Baur-Melnyk, A., Triantafyllou, M., Birkenmaier, C., & Reiser, M. (2006). Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule. *Der Radiologe*, 46(6), 454-467.

Birnberger, K. L., Burg, D., Birnberger, K. L., & Burg, D. (1978). Vertebrale Syndrome (Gk I A10). *Examens-Fragen Neurologie: Zum Gegenstandskatalog*, 42-47.

Bischoff, C. (2005). Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule - klinische Befunde, Operationsindikationen und konservative Therapiemöglichkeiten. *Journal für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie*, 6(3), 6-10.

Böstman, O. (1994). Prevalence of obesity among patients admitted for elective orthopaedic surgery. *International journal of obesity and related metabolic disorders. journal of the International Association for the Study of Obesity*, 18(10), 709-713.

Bredow, J., Prasse, T., & Eysel, P. (2022). Vermeidung von Anschlussdegenerationen nach operativer Therapie lumbaler, degenerativer Wirbelsäulenpathologien. *Die Wirbelsäule*, 6(03), 173-179.

Brock, M. (2007). *Die mikrochirurgische lumbale Bandscheiben-Operation: Vergleich der transmuskulären Zugangstechnik mit dem subperiostalen Standardzugang*.

Bullmann, V. (2022). Implantatversagen HWS-LWS nach langstreckigen Instrumentierungen beim Knochengesunden – Ursachen und Behandlungskonzepte. *Die Wirbelsäule*, 6(02), 84-91.

Burch, M. B., Wiegers, N. W., Patil, S., & Nourbakhsh, A. (2020). Incidence and risk factors of reoperation in patients with adjacent segment disease: A meta-analysis. *J Craniovertebr Junction Spine*, 11(1), 9-16. [https://doi.org/10.4103/jcvjs.JCVJS\\_10\\_20](https://doi.org/10.4103/jcvjs.JCVJS_10_20)

Bydon, M., Xu, R., Santiago-Dieppa, D., Macki, M., Sciubba, D. M., Wolinsky, J. P., Bydon, A., Gokaslan, Z. L., & Witham, T. F. (2014). Adjacent-segment disease in 511 cases of posterolateral instrumented lumbar arthrodesis: floating fusion versus distal construct including the sacrum. *J Neurosurg Spine*, 20(4), 380-386. <https://doi.org/10.3171/2013.12.Spine13789>

Cannizzaro, D., Anania, C. D., Safa, A., Zaed, I., Morengi, M., Riva, M., Tomei, M., Pessina, F., Servadei, F., Ortolina, A., & Fornari, M. (2023). Lumbar adjacent segment degeneration after spinal fusion surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Neurosurg Sci*, 67(6), 740-749. <https://doi.org/10.23736/s0390-5616.22.05891-x>

Casser, H.-R. (2016). Spezifischer, nichtspezifischer, akuter/subakuter und chronischer Rückenschmerz: Definition. In Rückenschmerzen und Nackenschmerzen, 73-75, *Springer*.

Charles, Y., Walter, A., Schuller, S., & Steib, J.-P. (2011). Dynamic instrumentation of the lumbar spine: Clinical and biomechanical analysis of success factors. *Der Orthopäde*, 40, 703-712.

Chenot, J.F. (2009). Extravertebrale Ursachen von Rückenschmerzen. *Zeitschrift für Allgemeinmedizin*, 85(12), 508-516.

Dallaudiere, B., Etchart, P., Perez, J. T., Fournier, C., Le Huec, J. C., & Hauger, O. (2020). Postoperative spino-pelvic stereoradiography to predict adjacent segment disease. *Diagn Interv Imaging*, 101(11), 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2020.06.005>

De la Garza-Ramos, R., Kerezoudis, P., Sciubba, D. M., Bydon, A., Witham, T. F., & Bydon, M. (2018). The effect of preoperative diagnosis on the incidence of adjacent segment disease after lumbar fusion. *J Neurosurg Sci*, 62(1), 4-9. <https://doi.org/10.23736/s0390-5616.16.03492-5>

De Sèze, S., Ryckewaert, A., & Guerin, C. (1970). Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule. In Klinik der rheumatischen Erkrankungen, 365-384, *Springer*.

Destatis (2024). Lebenserwartung und Sterblichkeit. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/Aspekte/demografie-lebenserwartung.html> [letzter Zugriff 18.07.2024]

Drumm, J., Branea, I., & Pitzen, T. (2010). Mikrochirurgische Dekompression der lumbalen Spinalkanalstenose. *Der Orthopäde*, 39(6), 551-558.

Ehni, G. (1981). The role of spine fusion: question 9. *Spine*, 6(3), 308-310.

Elfering, A., Semmer, N., Birkhofer, D., Zanetti, M., Hodler, J., & Boos, N. (2002). Risk factors for lumbar disc degeneration: a 5-year prospective MRI study in asymptomatic individuals. *Spine*, 27(2), 125-134. <https://doi.org/10.1097/00007632-200201150-00002>

Fabricius, J. (2021). Viele Diagnosen, ein Schmerzzustand. *Deutsche Heilpraktiker-Zeitschrift*, 16(05), 46-51.

Feldmann, P., & Wittenberg, R. (2001). Treatment of spinal disorders: historical review. *Der Orthopäde*, 30, 776-783.

Ferraris, L., Koller, H., Meier, O., & Hempfing, A. (2012). Die Bedeutung der sagittalen Balance in der Wirbelsäulenchirurgie. *OUP*, 1, 502-508.

Freiherr von Salis-Soglio, G., Scholz, R., & Seller, K. (2005). Interbody metal implants ("cages") for lumbar fusion. *Der Orthopäde*, 34, 1033-1039.

Fritsch, E. (2003). Spondylolisthesis. *Der Orthopäde*, 32, 340-361.

Gitter, S., & Kretschmer, H. (1996). Lumbalstenosen – operative Behandlung und Ergebnisse. *Aktuelles in der Chirurgie*, 194-200.

Gödde, S., Fritsch, E., Dienst, M., & Kohn, D. (2003). Influence of cage geometry on sagittal alignment in instrumented posterior lumbar interbody fusion. *Spine*, 28(15), 1693-1699. <https://doi.org/10.1097/01.Brs.0000083167.78853.D5>

Grohs, J. G., & Urach, F. (2019). Das sagittale Profil der Wirbelsäule. *Die Wirbelsäule*, 3(03), 182-188.

Guigui, P., Levassor, N., Rillardon, L., Wodecki, P., & Cardinne, L. (2003). [Physiological value of pelvic and spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 89(6), 496-506.

Hackenbroch, M. (1996). Das Lumbalsyndrom - Praevention, Diagnostik und Therapie. *Deutsches Ärzteblatt Köln*, 1158-1160.

Han, T. S.; Schouten, J. S.; Lean, M. E.; Seidell, J. C. (1997): The prevalence of low back pain and associations with body fatness, fat distribution and height. In: *International journal of obesity and related metabolic disorders : journal of the International Association for the Study of Obesity* 21 (7), S. 600–607. DOI: 10.1038/sj.ijo.0800448.

Hartvigsen, J., Hancock, M. J., Kongsted, A., Louw, Q., Ferreira, M. L., Genevay, S., Hoy, D., Karppinen, J., Pransky, G., Sieper, J., Smeets, R. J., Underwood, M., & Lancet Low Back Pain Series Working, G. (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet*, 391(10137), 2356-2367. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)30480-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30480-X)

Heider, F. C., & Siepe, C. J. (2016). Diagnostik und Therapie der degenerativ veränderten Lendenwirbelsäule. *Der Klinikarzt*, 45(10), 452-460.

Heipertz, W., Schmitt, E., & Heipertz, W. (1978). Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen. *Wirbelsäulenerkrankungen: Diagnostik und Therapie*, 77-86.

Jang, T. W., Ahn, Y. S., Byun, J., Lee, J. I., Kim, K. H., Kim, Y., Song, H. S., Lee, C. G., Kwon, Y. J., Yoon, J. H., & Jeong, K. (2016). Lumbar intervertebral disc degeneration and related factors in Korean firefighters. *BMJ Open*, 6(6), e011587. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-011587>

Kaila-Kangas, L., Leino-Arjas, P., Riihimäki, H., Luukkonen, R., & Kirjonen, J. (2003). Smoking and overweight as predictors of hospitalization for back disorders. *Spine*, 28(16), 1860-1868.

Khan, J. M., Basques, B. A., Harada, G. K., Louie, P. K., Chen, I., Vetter, C., Kadakia, K., Elboghdady, I., Colman, M., & An, H. S. (2020). Does increasing age impact clinical and radiographic outcomes following lumbar spinal fusion? *Spine J*, 20(4), 563-571. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.11.003>

Kim, M. K., Lee, S. H., Kim, E. S., Eoh, W., Chung, S. S., & Lee, C. S. (2011). The impact of sagittal balance on clinical results after posterior interbody fusion for patients with degenerative spondylolisthesis: a pilot study. *BMC Musculoskelet Disord*, 12, 69. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-12-69>

Kim, W. J., Ma, C. H., Kim, S. H., Min, Y. S., Lee, J. W., Chang, S. H., Park, K. H., Park, K. Y., Song, D. G., & Choy, W. S. (2019). Prevention of Adjacent Segmental Disease after Fusion in Degenerative Spinal Disorder: Correlation between Segmental Lumbar Lordosis Ratio and Pelvic Incidence-Lumbar Lordosis Mismatch for a Minimum 5-Year Follow-up. *Asian Spine J*, 13(4), 654-662. <https://doi.org/10.31616/asj.2018.0279>

Knetsch, A. (1967). Beitrag zur Osteochondrose. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, 107(12), 811-812.

Kocak, T., Kraus, M., Reichel, H., Winckelmann, J., & Weckbach, S. (2017). Therapieoptionen bei chronischen Schmerzsyndromen der Wirbelsäule. *OUP* 2017; 3: 142–146 DOI 10.3238/oup.2017.0142–0146

Krämer, R., Theodoridis, T., Krämer, J., (2012). Minimalinvasive Therapie-Injektionstherapie. *Die lumbale Spinalkanalstenose*, 73-81.

Kumar, M. N., Baklanov, A., & Chopin, D. (2001). Correlation between sagittal plane changes and adjacent segment degeneration following lumbar spine fusion. *Eur Spine J*, 10(4), 314-319. <https://doi.org/10.1007/s005860000239>

Lafage, V., Schwab, F., Patel, A., Hawkinson, N., & Farcy, J. P. (2009). Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine*, 34(17), E599-606. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181aad219>

Lazennec, J. Y., Ramaré, S., Arafati, N., Laudet, C. G., Gorin, M., Roger, B., Hansen, S., Saillant, G., Maurs, L., & Trabelsi, R. (2000). Sagittal alignment in lumbosacral fusion: relations between radiological parameters and pain. *Eur Spine J*, 9(1), 47-55. <https://doi.org/10.1007/s005860050008>

Le Huec, J. C., & Hasegawa, K. (2016). Normative values for the spine shape parameters using 3D standing analysis from a database of 268 asymptomatic Caucasian and Japanese subjects. *Eur Spine J*, 25(11), 3630-3637. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4485-5>

Lee, K. H., Yeo, W., Soeharno, H., & Yue, W. M. (2014). Learning curve of a complex surgical technique: minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS TLIF). *J Spinal Disord Tech*, 27(7), E234-240. <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000000089>

Legaye, J., Duval-Beaupere, G., Hecquet, J., & Marty, C. (1998). Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *European spine journal*, 7, 99-103.

Liang, J., Dong, Y., & Zhao, H. (2014). Risk factors for predicting symptomatic adjacent segment degeneration requiring surgery in patients after posterior lumbar fusion. *J Orthop Surg Res*, 9, 97. <https://doi.org/10.1186/s13018-014-0097-0>

Matsumoto, T., Okuda, S., Maeno, T., Yamashita, T., Yamasaki, R., Sugiura, T., & Iwasaki, M. (2017). Spinopelvic sagittal imbalance as a risk factor for adjacent-segment disease after single-segment posterior lumbar interbody fusion. *J Neurosurg Spine*, 26(4), 435-440. <https://doi.org/10.3171/2016.9.Spine16232>

Meyerding, H. (1932). Spondylolisthesis. *Surg gynecol obstet*, 54, 371-377.

Mimura, M., Panjabi, M., Oxland, T., Crisco, J. J., Yamamoto, I., & Vasavada, A. (1994). Disc degeneration affects the multidirectional flexibility of the lumbar spine. *Spine*, 19(12), 1371-1380.

Nakajima, H., Watanabe, S., Honjoh, K., Kubota, A., & Matsumine, A. (2024). Risk factors for early-onset adjacent segment degeneration after one-segment posterior lumbar interbody fusion. *Sci Rep*, 14(1), 9145. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59924-5>

Netter, F. (2001). *Netters Orthopädie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Niethard, F., & Pfeil, J. (2005). *Duale Reihe: Orthopädie* (Vol. 5). Georg Thieme Verlag.

Okuda, S., Yamashita, T., Matsumoto, T., Nagamoto, Y., Sugiura, T., Takahashi, Y., Maeno, T., & Iwasaki, M. (2018). Adjacent Segment Disease After Posterior Lumbar Interbody Fusion: A Case Series of 1000 Patients. *Global Spine J*, 8(7), 722-727. <https://doi.org/10.1177/2192568218766488>

Parenteau, C. S., Lau, E. C., Campbell, I. C., & Courtney, A. (2021). Prevalence of spine degeneration diagnosis by type, age, gender, and obesity using Medicare data. *Sci Rep*, 11(1), 5389. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84724-6>

Pfirrmann, C. W., Metzdorf, A., Zanetti, M., Hodler, J., & Boos, N. (2001). Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine*, 26(17), 1873-1878. <https://doi.org/10.1097/00007632-200109010-00011>

Putz, R. (2004). Anatomie der Lumbalstenose. *Der enge Spinalkanal*, 1-7.

Radl, R., Maafe, M., & Ziegler, S. (2011). Skoliose. *Der Orthopäde*, 40(5), 449-462.

Rao, R. D., David, K. S., & Wang, M. (2005). Biomechanical changes at adjacent segments following anterior lumbar interbody fusion using tapered cages. *Spine*, 30(24), 2772-2776.

Reith, W., Bodea, S., Kettner, M., Mühl-Benninghausen, R., & Simgen, A. (2014). Degenerative und altersbedingte Veränderungen an der Wirbelsäule. *Der Radiologe*, 54(11), 1069-1077.

Richter, R., Richter, S., & Forst, R. (2016). Bandscheibenvorfall. *Rückenschmerzen und Nackenschmerzen: Interdisziplinäre Diagnostik und Therapie, Versorgungspfade, Patientenedukation, Begutachtung, Langzeitbetreuung*, 431-445.

Rössler, H., & Rütger, W. (2005). *Orthopädie und Unfallchirurgie* (Vol. 19): Elsevier Verlag.

Rothenfluh, D. A., Mueller, D. A., Rothenfluh, E., & Min, K. (2015). Pelvic incidence-lumbar lordosis mismatch predisposes to adjacent segment disease after lumbar spinal fusion. *Eur Spine J*, 24(6), 1251-1258. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3454-0>

Roussouly, P., Gollogly, S., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2005). Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine*, 30(3), 346-353.

Saavedra-Pozo, F. M., Deusdara, R. A., & Benzel, E. C. (2014). Adjacent segment disease perspective and review of the literature. *Ochsner J*, 14(1), 78-83.

- Sato, S., Yagi, M., Machida, M., Yasuda, A., Konomi, T., Miyake, A., Fujiyoshi, K., Kaneko, S., Takemitsu, M., Machida, M., Yato, Y., & Asazuma, T. (2015). Reoperation rate and risk factors of elective spinal surgery for degenerative spondylolisthesis: minimum 5-year follow-up. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society*, 15(7), 1536–1544.
- Savarese, L. G., Menezes-Reis, R., Bonugli, G. P., Herrero, C. F. P. d. S., Defino, H. L. A., & Nogueira-Barbosa, M. H. (2020). Spinopelvic sagittal balance: what does the radiologist need to know? *Radiologia Brasileira*, 53, 175-184.
- Scharla, S. H. (2001). Altersbedingte Veränderungen des Bewegungsapparates—eine Übersicht. *Journal für Menopause*, 8(2), 27-31.
- Scheuer, R. (2018). Die Wirbelsäule im Blick. *Ärzte Woche* (39), 20-21.
- Schnake, K., Rappert, D., Storzer, B., Schreyer, S., Hilber, F., & Mehren, C. (2019). Lumbar fusion—Indications and techniques. *Der Orthopäde*, 48, 50-58.
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M., & Wesker, K. (2011). *Prometheus Lernatlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem* (Vol. 3). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Schulte, E., Schumacher, U., & Schünke, M. (2018). *Prometheus Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie*. Georg Thieme Verlag.
- Schwab, F., Patel, A., Ungar, B., Farcy, J. P., & Lafage, V. (2010). Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery. *Spine*, 35(25), 2224-2231. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4>
- Screven, R., Pressman, E., Rao, G., Freeman, T. B., & Alikhani, P. (2021). The Safety and Efficacy of Stand-Alone Lateral Lumbar Interbody Fusion for Adjacent Segment Disease in a Cohort of 44 Patients. *World Neurosurg*, 149, e225-e230. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.02.046>
- Senteler, M., Weisse, B., Snedeker, J. G., & Rothenfluh, D. A. (2014). Pelvic incidence-lumbar lordosis mismatch results in increased segmental joint loads in the unfused and fused lumbar spine. *Eur Spine J*, 23(7), 1384-1393. <https://doi.org/10.1007/s00586-013-3132-7>
- Shin, M. H., Ryu, K. S., Hur, J. W., Kim, J. S., & Park, C. K. (2013). Comparative study of lumbopelvic sagittal alignment between patients with and without sacroiliac joint pain after lumbar interbody fusion. *Spine*, 38(21), E1334-1341. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182a0da47>
- Storzer, B., Morrison, R., & Schnake, K. J. (2020). Spondylolisthese und Spondylolyse. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 15(05), 427-441.

Sturm, C., Teixido, L., Schiller, J., & Gutenbrunner, C. (2019). Physiotherapeutische und physikalisch-medizinische Verfahren in der Schmerzmedizin. *Praktische Schmerzmedizin: Interdisziplinäre Diagnostik-Multimodale Therapie*, 173-188.

Thomé, C., Börm, W., & Meyer, F. (2008). Die degenerative lumbale Spinalkanalstenose. *Deutsches Ärzteblatt*, 105, 373-379.

Toivonen, L. A., Mäntymäki, H., Häkkinen, A., Kautiainen, H., & Neva, M. H. (2022). Postoperative Sagittal Balance Has Only a Limited Role in the Development of Adjacent Segment Disease After Lumbar Spine Fusion for Degenerative Lumbar Spine Disorders: A Subanalysis of the 10-year Follow-up Study. *Spine*, 47(19), 1357-1361. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000004400>

Tomkins-Lane, C. C., Battié, M. C., Hu, R., & Macedo, L. (2014). Pathoanatomical characteristics of clinical lumbar spinal stenosis. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*, 27(2), 223-229.

Umehara, S., Zindrick, M. R., Patwardhan, A. G., Havey, R. M., Vrbos, L. A., Knight, G. W., Miyano, S., Kirincic, M., Kaneda, K., & Lorenz, M. A. (2000). The biomechanical effect of postoperative hypolordosis in instrumented lumbar fusion on instrumented and adjacent spinal segments. *Spine*, 25(13), 1617-1624.

Vaz, G., Roussouly, P., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2002). Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *European spine journal*, 11, 80-87.

Verla, T., Adogwa, O., Toche, U., Farber, S. H., Petraglia, F., 3rd, Murphy, K. R., Thomas, S., Fatemi, P., Gottfried, O., Bagley, C. A., & Lad, S. P. (2016). Impact of Increasing Age on Outcomes of Spinal Fusion in Adult Idiopathic Scoliosis. *World Neurosurg*, 87, 591-597. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.10.061>

Vogel, P. (1984). Klinik des engen Spinalkanals. *Lendenwirbelsäulenerkrankungen mit Beteiligung des Nervensystems*, 207-212.

von der Lippe, E., Krause, L., Prost, M., Wengler, A., Leddin, J., Müller, A., Zeisler, M.-L., Anton, A., Rommel, A., & group, B. s. (2021). Prävalenz von Rücken- und Nackenschmerzen in Deutschland. Ergebnisse der Krankheitslast-Studie Burden 2020.

Walter, C., Baumgärtner, T., Trappe, D., Frantz, S., Exner, L., & Mederake, M. (2021). Influence of Cage Design on Radiological and Clinical Outcomes in Dorsal Lumbar Spinal Fusions: A Comparison of Lordotic and Non-Lordotic Cages. *Orthopaedic surgery*, 13(3), 863-875. <https://doi.org/10.1111/os.12872>

Wang, S. J., Zhang, S. B., Yi, Y. Y., Xu, H. W., & Wu, D. S. (2020). Estimation of the ideal correction of lumbar lordosis to prevent reoperation for symptomatic adjacent segment disease after lumbar fusion in older people. *BMC Musculoskeletal Disord*, 21(1), 429. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03463-3>

- Wang, Y. X., Griffith, J. F., Ma, H. T., Kwok, A. W., Leung, J. C., Yeung, D. K., Ahuja, A. T., & Leung, P. C. (2011). Relationship between gender, bone mineral density, and disc degeneration in the lumbar spine: a study in elderly subjects using an eight-level MRI-based disc degeneration grading system. *Osteoporos Int*, 22(1), 91-96. <https://doi.org/10.1007/s00198-010-1200-y>
- Weckbach, S., Reichel, H., & Kocak, T. (2017). Surgical strategies in degenerative lumbar spine diseases. *OUP*, 3, 125-129.
- Werner, I., Rauschmann, M., & Fleege, C. (2014). Anschlussdegeneration Langzeitkomplikation nach lumbaler Fusion. *Sport-Orthopädie-Sport-Traumatologie-Sports Orthopaedics and Traumatology*, 30(3), 256-266.
- WHO. (2000). Obesity: preventing and managing the global epidemic. Report of a WHO consultation. *World Health Organ Tech Rep Ser*, 894, i-xii, 1-253.
- Wiese, M., Krämer, J., Becker, C., Nentwig, V., Theodoridis, T., & Teske, W. (2009). Rückenschule heute. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 147(02), 194-198.
- Wittenberg, R., Willburger, R., & Krämer, J. (1998). Spondylolyse und Spondylolisthese: Diagnose und Therapie. *Der Orthopäde*, 27, 51-63.
- Yamasaki, K., Hoshino, M., Omori, K., Igarashi, H., Nemoto, Y., Tsuruta, T., Matsumoto, K., Iriuchishima, T., Ajiro, Y., & Matsuzaki, H. (2017). Risk Factors of Adjacent Segment Disease After Transforaminal Inter-Body Fusion for Degenerative Lumbar Disease. *Spine*, 42(2), e86-e92. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000001728>
- Yoon, S. G., Lee, H. C., & Lee, S. M. (2023). Pelvic Incidence-Lumbar Lordosis Mismatch Is Predisposed to Adjacent Segment Degeneration After Single-Level Anterior Lumbar Interbody Fusion: A Retrospective Case-Control Study. *Neurospine*, 20(1), 301-307. <https://doi.org/10.14245/ns.2244934.467>
- Zheng, G., Wang, C., Wang, T., Hu, W., Ji, Q., Hu, F., Li, J., Chaudhary, S. K., Song, K., Song, D., Zhang, Z., Hao, Y., Wang, Y., Li, J., Zheng, Q., Zhang, X., & Wang, Y. (2020). Relationship between postoperative lordosis distribution index and adjacent segment disease following L4-S1 posterior lumbar interbody fusion. *J Orthop Surg Res*, 15(1), 129. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01630-9>
- Zhu, F., Bao, H., Qiu, Y., Yan, P., He, S., Zhou, H., Liu, Z., & Zhu, Z. (2015). [Restoration of the difference value of pelvic incidence and lumbar lordosis in degenerative scoliosis patients: its influence in maintaining sagittal profile and improving quality of life]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*, 53(2), 110-115.

## 7. Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde in der Universitätsklinik für Orthopädie Tübingen unter der Betreuung von PD Dr. med. Christian Walter und Dr. med. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt durchgeführt.

Die Konzeption der Studie sowie die Erstellung des Auswertungsskriptes erfolgte durch mich in Zusammenarbeit mit PD Dr. med. Christian Walter und Dr. med. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt.

Die retrospektive Erhebung und Verwaltung der Patientendaten sowie der radiologischen Daten wurde nach Anleitung von PD Dr. med. Christian Walter und Dr. med. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt von mir eigenständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte durch mich in Zusammenarbeit mit Dr. med. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt.

Ich versichere hiermit, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 06.12.2024

Daniel Müller

## 8. Veröffentlichung von Studienergebnissen

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind bereits auf dem deutschen Wirbelsäulenkongress am 09.12.2021 von Dr. med. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt in Form eines Vortrages vorgestellt worden.

## 9. Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle gerne bei den Menschen bedanken, die mich beim Erarbeiten dieser Dissertation unterstützt haben.

Ein großes Dankeschön gilt Hr. PD Dr. Christian Walter sowie Dr. Dipl. Psych. Felix Bausenhardt, für Ihre wertvolle Unterstützung und kompetente Betreuung während der gesamten Anfertigung dieser Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Freundin für die riesige Unterstützung in den letzten Jahren. Vielen Dank für stetigen hilfreichen Rat, viel Geduld und guten Zuspruch.