

Aus der
Universitätsklinik für Orthopädie

**Unterscheidet sich der untere Rückenschmerz bei
Patient:innen mit S2-Ala-Iliumschrauben im Vergleich
zu Patient:innen ohne S2-Ala-Iliumschrauben
nach langstreckigen dorsalen Spondylodesen über
mindestens 3 Segmente?**

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

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

vorgelegt von
Heller, Nicola Christiane Gisela

2026

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. med. C. Walter

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. med. A. Badke

Tag der Disputation: 20.01.2026

Für Mama

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	8
2	Abbildungsverzeichnis	10
3	Tabellenverzeichnis	12
4	Einleitung	13
4.1	Rückenschmerzen	13
4.1.1	Epidemiologie	13
4.1.2	Risikofaktoren	16
4.1.3	Ursachen	18
4.1.3.1	Schwierigkeiten bei der Diagnosestellung	18
4.1.3.2	Failed Back Surgery Syndrom (FBSS)/ chronischer Schmerz nach Wirbelsäulenchirurgie	18
4.1.4	Das Iliosakralgelenk	19
4.2	Diagnostik von Rückenschmerzen	21
4.3	Therapie von Rückenschmerzen	23
4.3.1	Konservative Therapie	23
4.3.2	Operative Therapie mittels Spondylodese	24
4.3.2.1	Epidemiologie	25
4.3.2.2	Indikationen	26
4.3.2.3	Operationsmethode	27
4.3.2.4	Dorsale Verfahren	28
4.3.2.5	Ventrale Verfahren	29
4.3.2.6	Sakropelvine Fixierung: S2Al-Schrauben vs. Iliumschrauben	31
4.3.2.7	Komplikation: Postoperative Schmerzen des Iliosakralgelenks	35
4.4	Fragestellung	38
5	Material und Methoden	39
5.1	Studiendesign	39

5.2	Operationsmethode	41
5.2.1	Vorbereitung	41
5.2.2	Durchführung	42
5.2.3	Eigenschaften der Cages	47
5.2.4	Postoperative Nachsorge	48
5.3	Nachuntersuchung	49
5.4	Fragebogenauswertung	54
5.4.1	Oswestry Disability Index (ODI)	55
5.4.2	Roland - Morris Score (RMS)	56
5.4.3	Visuelle Analog Skala (VAS)	56
5.5	Radiologische Verfahren	57
5.5.1	Radiologische Untersuchungstechnik	57
5.5.2	Spinopelvine Parameter und lumbale Lordose	57
5.6	Statistische Methoden	61
6	Ergebnisse	62
6.1	Resultate der gesamten Studienpopulation	62
6.1.1	Deskriptive Erhebungen	62
6.1.2	Klinische Untersuchungsergebnisse der Kohorte	64
6.1.2.1	Fragebogendiagnostik und Scoring System for Sacroiliac Joint Pain	64
6.1.2.2	Beweglichkeitsprüfungen	65
6.1.2.3	Neurologische Evaluation	65
6.1.3	Korrelation von klinischen und radiologischen Outcomeparametern unabhängig von der ursprünglichen Gruppeneinteilung	66
6.1.3.1	Pelvic Tilt	66
6.1.3.2	Der Effekt von Voroperationen auf die Funktionalität	67
6.1.3.3	Der Zusammenhang von PI und ISG-Schmerzen	67
6.1.4	Radiologische Ergebnisse aller Teilnehmenden	68
6.2	Vergleich von Untersuchten mit und ohne S2AI-Schrauben	69
6.2.1	Charakteristika der Teilnehmenden	69

6.2.2	Gegenüberstellung der klinischen Untersuchungsergebnisse	70
6.2.2.1	Fragebogendiagnostik und Scoring System for Sacroiliac Joint Pain	70
6.2.2.2	Beweglichkeitsprüfungen und neurologische Untersuchungen	74
6.2.3	Resultate der radiologischen Überprüfung	76
7	Diskussion	77
7.1	Vergleichende Bewertung der klinischen Ergebnisse	77
7.1.1	Messung der Empfindungsstärke mittels Visueller Analogskala	78
7.1.2	Erfassung der alltäglichen Einschränkungen durch den Oswestry Disability Index	79
7.1.3	Einschätzung der physischen Beeinträchtigung anhand des Roland-Morris Scores	81
7.1.4	Beweglichkeitsuntersuchungen	82
7.2	Sakropelvine Parameter sind unabhängig von der zusätzlichen Fixation mit S2AI-Schrauben	83
7.3	Erstoperierte vs. Reoperierte	86
7.4	Niedrigeres Risiko für ISG-Schmerzen durch S2AI-Schrauben	87
7.5	Limitationen	89
7.5.1	Studiendesign	89
7.5.2	Patient:innenspezifische Komplikationen	90
7.5.3	Limitationen der klinischen Ergebnisse	91
7.5.4	Limitationen der radiologischen Ergebnisse	91
7.6	Ausblick: Klinische Anwendung und Relevanz der Ergebnisse	91
8	Schlussfolgerung	94
9	Zusammenfassung	94
10	Literaturverzeichnis	96
11	Erklärung zum Eigenanteil	107

12	Anhänge	108
12.1	Anhang 1: Oswestry Disability Index (ODI)	108
12.2	Anhang 2: Roland Morris Score (RMS)	110
12.3	Anhang 3: Visuelle Analog Skala (VAS)	111
13	Danksagung	112

1 Abkürzungsverzeichnis

ALIF	Anterior Lumbar Interbody Fusion [en]
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
BWS	Brustwirbelsäule
COPD	Chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CPSS	Chronischer Schmerz nach Wirbelsäulen Chirurgie
CT	Computertomographie
FBA	Fingerbodenabstand
FBSS	Failed Back Surgery Syndrom [en]
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems [en]
IS	Iliumschrauben
ISG	Iliosakralgelenk
LKA	Liege-Kinn-Abstand
LL	Lumbale Lordose
LLIF	Lateral Lumbar Interbody Fusion [en]
LWS	Lendenwirbelsäule
MAR	Missing at random [en]
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Arithmetischer Mittelwert
NRS	Numeric Rating Scale [en]

ODI	Oswestry Disability Index [en]
OLIF	Oblique Lumbar Interbody Fusion [en]
OPS	Operationen- und Prozedurenschlüssel
p.a.-Projektion	posterior-anterior-Projektion
PACS	Picture Archiving and Communication System [en]
PEEK	Polyetheretherketon
PI	Pelvic Incidence [en]
PLIF	Posterior Lumbar Interbody Fusion [en]
PROMs	Patient-reported outcome measures [en]
PT	Pelvic Tilt [en]
RMS	Roland-Morris Score [en]
S2AI-Schrauben	S2-Ala-Iliumschrauben
SD	Standardabweichung, Standard Deviation [en]
SJP	Sacroiliac Joint Pain [en]
SS	Sacral Slope [en]
TLIF	Transforaminal Lumbar Interbody Fusion [en]
T-PAL	Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem
VAS	Visuelle Analogskala
WHO	World Health Organization [en]
XLIF	Extreme Lateral Interbody Fusion [en]

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil der häufigsten Hauptdiagnosen an allen M40- bis M54-Fällen (Zich K., 2017)	13
Abbildung 2: Anzahl der Hospitalisierungen aufgrund einer Hauptdiagnose M47, M48, M51 oder M54 (Zich K., 2017).....	14
Abbildung 3: Prävalenz von Rückenschmerzen (mind. 3 Monate andauernd, in den letzten zwölf Monaten) nach Alter und Sozialstatus (Robert-Koch-Institut, 2015)	17
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bänder des Beckens von dorsal: 1/2 Lig. Iliolumbale, 3 Lig. sacrospinale, 4 Lig. sacrotuberale, 5 Ligg. sacroiliaca dorsalia	20
Abbildung 5: Chirurgische Zugangswege bei einer lumbalen Spondylodese. Darstellung der 5 primären Wege: anterior (ALIF), lateral oder extreme lateral interbody fusion (LLIF/ XLIF), oblique lumbar interbody fusion/anterior (OLIF), transforaminal (TLIF) und posterior (PLIF) (Mobbs et al., 2015).....	30
Abbildung 6: Schematische Darstellung von S2AI-Schrauben (a) und Iliumschrauben (b) (Gao et al., 2021).....	32
Abbildung 7: Platzierung der Pedikelschrauben (Lattig & Weckbach, 2017) .	43
Abbildung 8: Entfernung des Bandscheibenmaterials mit abgewinkelter Knochenkürette (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012).....	44
Abbildung 9: Einbringen des Cages (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012)	45
Abbildung 10: Platzierung der S2AI-Schrauben (Lattig & Weckbach, 2017)..	46
Abbildung 11a: T-PAL Implantat der Firma Synthes aus PEEK und 11b: Beispiel des Ergebnisses der Implantation eines lumbales Cagesystems (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012)	48
Abbildung 12: Auswertung des Ein-Finger-Tests und Abbildung 13: Durchführung des Schertests	52

Abbildung 14: Messung der radiologischen lumbalen Parameter (C. Walter et al., 2021).....	59
Abbildung 15: Spinopelvine Parameter (Ulrich et al., 2021), PI = pelvic incidence, SS = sacral slope, PT = pelvic tilt.....	60
Abbildung 16: Vergleich von Proband:Innen mit physiologischem und pathologischem pelvic tilt (PT) und deren Resultate beim Oswestry Disability Index (ODI).....	66
Abbildung 17: Vergleich von Proband:innen mit und ohne Voroperationen und deren Resultate beim Oswestry Disability Index (ODI)	67
Abbildung 18: Gruppenvergleich bezüglich des Oswestry Disability Index (ODI)	70
Abbildung 19: Gruppenvergleich bezüglich des Roland-Morris Score (RMS)	71
Abbildung 20: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) bei Belastung.....	72
Abbildung 21: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) in Ruhe	72
Abbildung 22: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) nachts	73
Abbildung 23: Gruppenvergleich bezüglich des Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain.....	74

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl empfohlener Basisuntersuchungen und weiterführender Untersuchungen bei Kreuzschmerzen (Bundesärztekammer (BÄK), 2017), LWS = Lendenwirbelsäule	22
Tabelle 2: Prozeduren aus der OPS-Gruppe 5-83: Operationen an der Wirbelsäule (Zich K., 2017), OPS = Operationen- und Prozedurenschlüssel	26
Tabelle 3: Studienergebnisse von (Unoki et al., 2019).....	37
Tabelle 4: Erfasste Daten dieser Studie	41
Tabelle 5: Bewertungssystem für Schmerzen des Iliosakralgelenks (Scoring System for Sacroiliac Joint Pain) (D. Kurosawa et al., 2017).....	51
Tabelle 6: Schmerzpunkte des Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain	53
Tabelle 7: Beurteilung der Muskelkraft nach Medical Research Council (Paternostro-Sluga et al., 2008)	53
Tabelle 8: Übersicht der ausgewerteten berichteten Zielgrößen.....	55
Tabelle 9: Tests auf Normalverteilung, S2AI-Schrauben = S2AI-Schrauben, df = degree of freedom/ Freiheitsgrad, ODI = Oswestry Disability Index, VAS = Visuelle Analog Skala, RMS = Roland Morris Score	63
Tabelle 10: Fehlende Werte	64
Tabelle 11: Übersicht der deskriptiven Daten.....	70
Tabelle 12: Mittelwerte der Untersuchungsergebnisse im Gruppenvergleich, SD = Standardabweichung.....	75
Tabelle 13: Mittelwerte der Beweglichkeitsuntersuchungsergebnisse im Gruppenvergleich, SD = Standardabweichung	76
Tabelle 14: Mittelwerte der radiologischen Ergebnisse im Gruppenvergleich, LL = lumbaler Lordosewinkel, PT = pelvic tilt, PI = pelvic incidence, SS = sacral slope, SD = Standardabweichung	77

4 Einleitung

4.1 Rückenschmerzen

4.1.1 Epidemiologie

Rückenschmerzen haben sich längst als Volkskrankheit etabliert. Die Lebenszeitprävalenz für untere Rückenschmerzen beträgt 80 % (Kostev, 2019). In den Jahren 2009 und 2010 erhobene Daten des Robert Koch-Instituts zeigen, dass jede vierte Frau und etwa jeder sechste Mann in den letzten zwölf Monaten unter chronischen Rückenschmerzen litt; damit sind Rückenschmerzen gemeint, die drei Monate oder länger anhalten und fast täglich auftreten.

Im Jahr 2015 wurden in deutschen Krankenhäusern 611.000 Fälle mit einer Hauptdiagnose aus der ICD-10-Gruppe M40 bis M54 "Krankheiten der Wirbelsäule und des Rückens" vollstationär behandelt (Zich K., 2017). Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, sind dabei ca. 80% dieser Fälle folgenden vier Hauptdiagnosen zuzuordnen:

M47 Spondylose

M48 Sonstige Spondylopathien

M51 Sonstige Bandscheibenschäden

M54 Rückenschmerzen

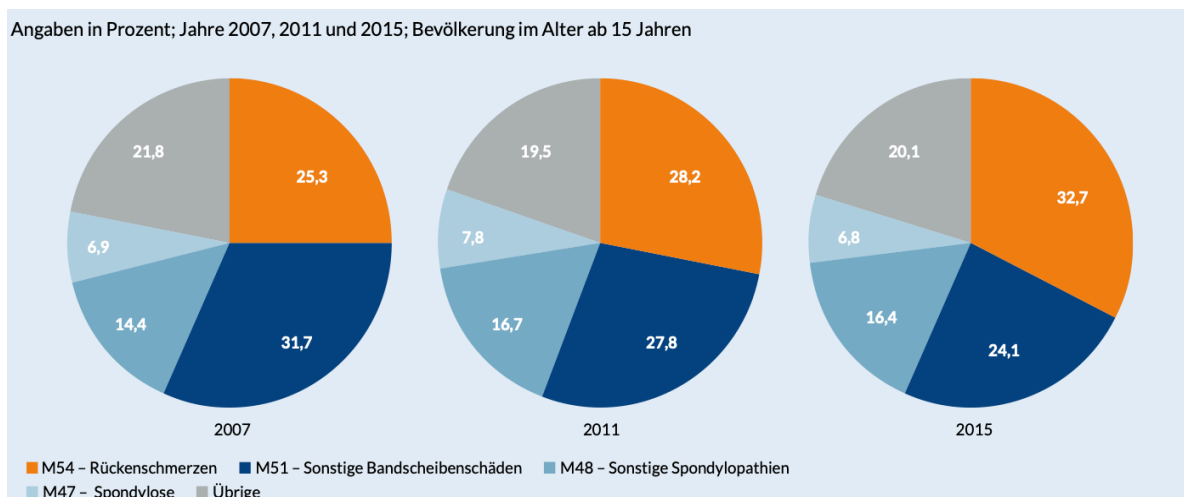


Abbildung 1: Anteil der häufigsten Hauptdiagnosen an allen M40- bis M54-Fällen (Zich K., 2017)

Es zeigt sich eine erhöhte Notwendigkeit der Hospitalisierung mit steigendem Lebensalter der Patient:innen (siehe Abb. 2).

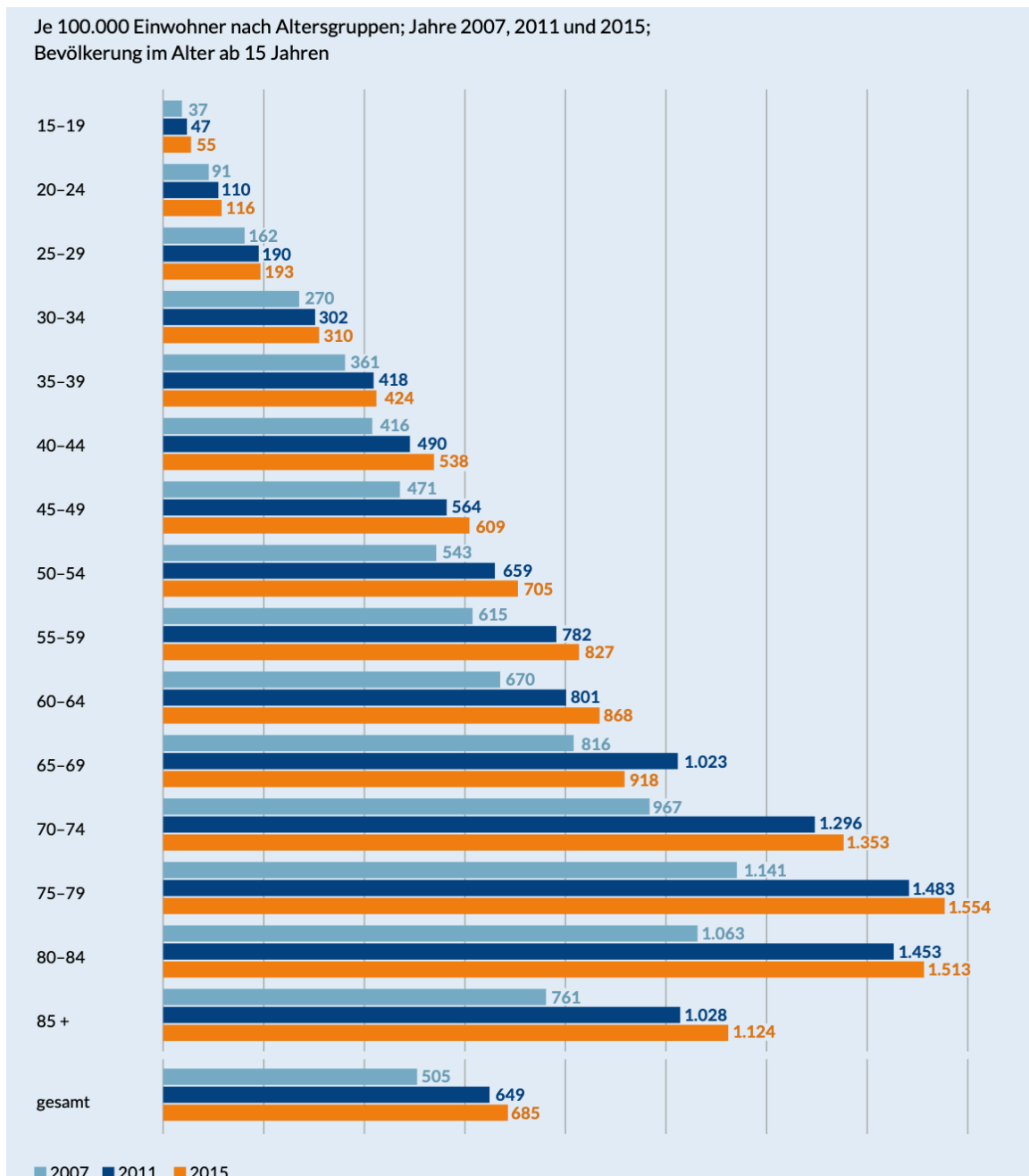


Abbildung 2: Anzahl der Hospitalisierungen aufgrund einer Hauptdiagnose M47, M48, M51 oder M54 (Zich K., 2017)

Die Pole Position nehmen Rückenschmerzen ein, wenn es um Gründe für Arbeitsunfähigkeit und Rehabilitationen geht und verursachen somit erhebliche finanzielle Belastungen für Arbeitgeber und Krankenkassen. Die direkten Kosten

umfassen Behandlungen, Arztbesuche, Rehabilitationsmaßnahmen und Krankengeldzahlungen, während die indirekten Kosten vor allem durch krankheitsbedingte Fehlzeiten und Produktivitätsverluste entstehen. Rückenschmerzen sind der häufigste Grund für Fehlzeiten am Arbeitsplatz und führen zu einem hohen Anteil an Frühverrentungen. 2020 betrug die Krankheitskosten für Rückenschmerzen 11,6 Milliarden Euro, die größten Ausgaben verursachen stationäre Behandlungen, ambulante Arztkosten und Krankengeldzahlungen (AOK, 2023; Gerlach, 2018).

Chronischer Schmerz im unteren Rückenbereich verursacht jährlich den Verlust von 83 Millionen Lebensjahren, aufgrund von Krankheit oder Behinderung. Die Folgen von Schmerzen im unteren Rückenbereich sind kostspieliger als bei vielen anderen schwerwiegenden Erkrankungen, wie Krebs oder chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD), und sie sind die sechsthäufigste Ursache für eine Abnahme der weltweiten sogenannten *disability-adjusted life years*. In den hochentwickelten Ländern, gehören Rückenschmerzen zu den drei häufigsten Ursachen für Jahre mit Behinderung, und die Beeinträchtigung durch chronische Rückenschmerzen wird in den meisten Ländern als hoch eingestuft (Cher, Polly, & Berven, 2014).

Hinzuzufügen ist außerdem, dass Personen mit Rückenschmerzen häufiger als schmerzfreie Befragte Begleiterkrankungen und gesundheitliche Beschwerden, wie Erschöpfung, Kopfschmerzen und kardiovaskuläre Symptome, aber auch Depressionen und Angststörungen angeben (Bundesärztekammer (BÄK), 2017). Die Deutsche Rentenversicherung verzeichnete im Jahr 2015 für fast 11 % der Rentenzugänge wegen verminderter Erwerbsfähigkeit die ICD-10-Codes M40 - M54 als Ursache. Diese umfassen ausschließlich „Deformitäten der Wirbelsäule und des Rückens“, „Spondylopathien“ und „Sonstige Krankheiten der Wirbelsäule und des Rückens“ (*Rentenzugänge wegen verminderter Erwerbsfähigkeit in der Gesetzlichen Rentenversicherung im Laufe des Berichtsjahres, 2015*).

Unterschieden wird ursachenbedingt zwischen spezifischen und unspezifischen Rückenschmerzen. Diese Differenzierung ist insbesondere für die Wahl der Therapie unabdingbar. Schätzungsweise 80 % der Rückenschmerzen sind

unspezifisch (Robert-Koch-Institut, 2012), also ohne konkrete pathophysiologische oder anatomische Begründung.

Klassifiziert werden kann außerdem nach der Dauer des empfundenen Schmerzes. Als akut gilt ein Zeitraum von unter sechs Wochen, als subakut ein solcher von sechs bis zwölf Wochen und als chronisch werden Rückenschmerzen bezeichnet, wenn diese länger als zwölf Wochen bestehen (Bundesärztekammer (BÄK), 2017). Zudem kann durch Indikatoren wie Häufigkeit der Arztbesuche und Schmerzmitteleinnahme, Intensitätsverlauf der Schmerzen, Komorbiditäten oder Einschränkung der Lebensqualität das Chronifizierungsstadium näher beschreiben werden.

4.1.2 Risikofaktoren

Ein besonders relevanter Risikofaktor für Rückenschmerzen ist die beruflich bedingte schwere körperliche Arbeit (Heben oder Tragen schwerer Lasten, extreme Rumpfbeugehaltung), die über viele Jahre ausgeführt wird. Dadurch bedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule sind als Berufskrankheiten im Sinne der gesetzlichen Unfallversicherung als Versicherungsfall anerkannt (§ 9 SGB 7 iVm Nr. 2109 der Anlage 1 zur Berufskrankheitenverordnung).

Ergebnisse von Bevölkerungsumfragen des Robert-Koch-Institutes zeigen, wie in Abbildung 3 erkennbar, außerdem einen Zusammenhang zwischen sozialem Status und Rückenschmerzen auf. Ein hoher sozialer Status wird gemessen an Bildung, Einkommen und beruflicher Position. Die Häufigkeit von Rückenschmerzen nimmt bei geringerer Statuierung offenbar zu. Eine Studie von 2000 zu diesem Thema hat herausgefunden, dass das Risiko für schwere Rückenschmerzen bei Personen mit Hauptschulabschluss etwa dreimal so hoch ist, wie bei Personen mit Abitur (Latza, Kohlmann, Deck, & Raspe, 2000).

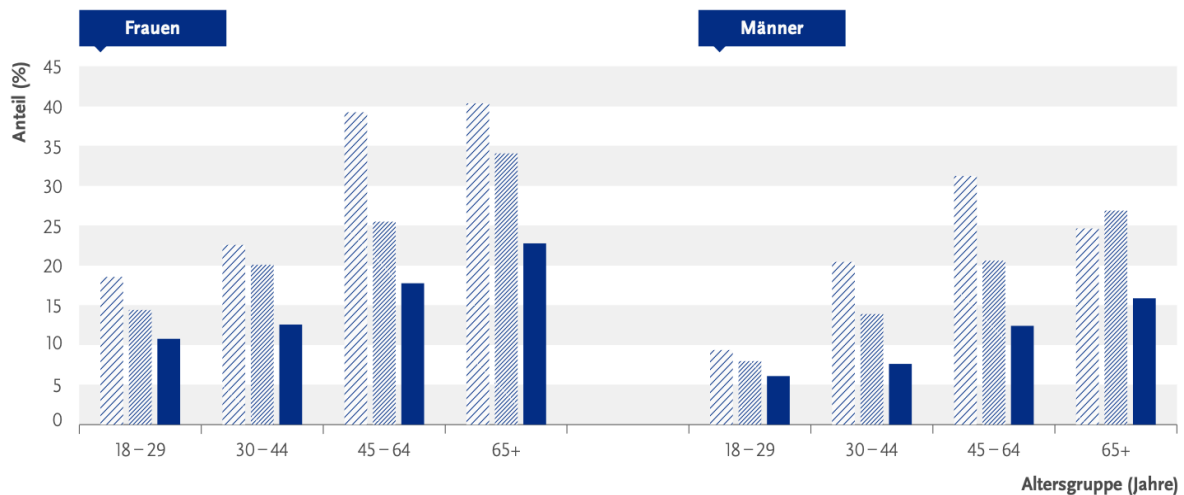


Abbildung 3: Prävalenz von Rückenschmerzen (mind. 3 Monate andauernd, in den letzten zwölf Monaten) nach Alter und Sozialstatus (Robert-Koch-Institut, 2015)

Sozialstatus
 Niedrig
 Mittel
 Hoch

Zudem spielen psychosoziale Faktoren wie Gratifikationsdefizite am Arbeitsplatz hier eine zentrale Rolle. Es wird ein Missverhältnis zwischen Anerkennung und Leistung empfunden, welches sich negativ auf die Arbeitsplatzzufriedenheit und das seelische Wohlbefinden auswirkt (Siegrist, 2012).

Insbesondere bei unspezifischen Rückenschmerzen sollten psychische Ursachen berücksichtigt werden, da diese die Therapie und Prognose beeinflussen können (Bundesärztekammer (BÄK), 2017). Eine Studie zu Rückenschmerzen bei Pflegekräften im Jahr 2018 zeigt einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem subjektiv empfundenen allgemeinen Gesundheitszustand und Rückenschmerzen, während dagegen z.B. berufstypische Arbeitskonflikte wie etwa die Überlastung mit zu vielen Patient:innen oder Zeitdruck eine solche Relation nicht herstellt (Frey, Rieger, Diehl, & Pinzon, 2018).

Als Risikofaktoren spielen auch Häufigkeiten vorangegangener Schmerzepisoden und damit verbundene Befürchtungen und Ängste eine Rolle, und sind nicht außer Acht zu lassen. Die Wiederholungswahrscheinlichkeit einer Episode unteren Rückenschmerzes untersucht eine 2019 publizierte prospektive Kohortenstudie, mit 250 Proband:innen in einem Zeitraum von zwölf Monaten nach dieser Begebenheit. 69 % der Teilnehmer hatten erneut eine Episode von unteren Rückenschmerzen. Prognostisch wahrscheinlichkeits erhöhende Faktoren sind dabei unbequeme Sitzpositionen, Sitzen von mehr als fünf Stunden

täglich und mehr als zwei vorangegangene Schmerzzustände (da Silva et al., 2019).

4.1.3 Ursachen

6.1.2.1 Schwierigkeiten bei der Diagnosestellung

Als grundsätzliche Ausgangsproblematik ist die offensichtliche Schwierigkeit des sicheren Nachweises einer eindeutigen Ursache der klinischen Beschwerden zu nennen. Es kann nur bis zu einer Rate von 15 % aller lumbalen Rückenschmerzen mit einer spezifischen Diagnose gerechnet werden, davon entfallen 4 % auf einen Bandscheibenprolaps, 3 % auf eine Spinalkanalstenose und 2 % auf eine Spondylolisthesis. Schätzungsweise 1–4 % weisen in der Primärversorgung eine Wirbelkörperfraktur auf, bei 0,7 % lässt sich ein primärer Tumor beziehungsweise eine Metastase nachweisen, 0,2 % zeigen eine Spondylarthritis ankylosans und 0,01 % eine Spondylodiszitis (Casser, Seddigh, and Rauschmann (2016).

Ein Großteil der Ursachen des Rückenschmerzes sind Funktionsstörungen, die zumeist nur anhand klinischer Befunde nachweisbar sind. Auch ergänzende bildgebende Verfahren führen dabei zu keinem eindeutigen Ergebnis. Dies trifft beispielsweise bei segmentalen Dysfunktionen, dem Iliosakralgelenk-Syndrom oder gestörten Muskelfunktionen zu (Casser et al., 2016).

6.1.2.2 Failed Back Surgery Syndrom (FBSS)/ chronischer Schmerz nach Wirbelsäulen chirurgie

Ein besondere Fallgruppe des soweit ebenfalls als unspezifisch zu bezeichnenden Rückenschmerzes bildet das Failed Back Surgery Syndrom (FBSS), chronische Schmerzsymptomatik nach Wirbelsäulen chirurgie:

Patient:innen klagen nach der Operation weiterhin über anhaltende oder neu aufgetretene Kreuzschmerzen (Frymoyer, Howe, & Kuhlmann, 1978). Die International Association for the Study of Pain definiert das FBSS als Lendenwirbelsäulenschmerzen unbekannter Ursache, die entweder trotz eines chirurgischen Eingriffs bestehen bleiben oder nach einem chirurgischen Eingriff an derselben ursprünglichen topografischen Stelle wahrgenommen werden (Baber & Erdek, 2016).

Die Zunahme der Häufigkeit von lumbalen/ lumbosakralen Fusionsoperationen in den letzten Jahrzehnten hat bei einer statistischen Misserfolgsrate zwischen 5 und 30 % über die verschiedenen Studien hinweg, zwangsläufig eine stetige Erhöhung der absoluten Zahl der dadurch Betroffenen zur Folge (Chan & Peng, 2011).

Die neue ICD-11 (International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) Nomenklatur verwendet in diesem Zusammenhang den bewertungsfreien Begriff des chronischen Schmerzes nach Wirbelsäulenchirurgie (CPSS), da der Terminus „fehlgeschlagen“ entweder ein „Verschulden“ der Patient:innen oder der Operierenden impliziert, und dadurch chronische Schmerzpatient:innen stigmatisiert und möglicherweise den Zugang zu einer potenziell wirksamen Behandlung erschwert (Christelis et al., 2021).

Der Wechsel in der Terminologie sollte nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Problemstellung für Behandelnde wie Behandelte virulent ist, aber nicht als Endpunkt eines negativen klinischen Ergebnisses angesehen werden darf.

Begünstigende Faktoren können zudem die psychosoziale Prädisposition der Patient:innen, Adipositas und Rauchen, aber auch intraoperativen Risiken, wie die Operation auf der falschen Wirbelhöhe oder die Anwendung einer falschen Technik während des Eingriffs sein. Postoperative Komplikationen wie eine Spinalkanalstenose, Wirbelsäuleninstabilität, Epiduralfibrose oder die Zerstörung benachbarter Bandscheiben können ebenfalls zu einem FBSS führen (Baber & Erdek, 2016; Chan & Peng, 2011). Insbesondere das Iliosakralgelenk kann als Quelle dieser anhaltenden Schmerzen in Betracht kommen.

4.1.4 Das Iliosakralgelenk

Das Iliosakralgelenk verbindet das Os ilium mit dem Os sacrum und ist einzigartig, da es Elemente sowohl der Synarthrose als auch der Diarthrose aufweist und die beiden mechanischen Funktionen Formschluss und Kraftschluss miteinander verbindet. Das Sakrum sitzt in einem Bogengewölbe zwischen den beiden Beckenschaufeln und wird einerseits durch knöchernerne Kompression und andererseits zugbelastete Ligamente und Scherkräfte beansprucht. Es enthält unregelmäßig geformte Knorpeloberflächen, Synovialflüssigkeit und ist von einer

fibrösen Kapsel umgeben. Expert:innen diskutieren fortgesetzt das Verständnis über die Bewegung und Struktur des Iliosakralgelenks und des Beckengürtelsystems. Die aktuelle Forschung unterstützt die Existenz einer begrenzten Bewegung im Iliosakralgelenk (ISG). Es wird durch einen ausgeprägten hinteren Bandkomplex stabilisiert, der die Bewegung einschränkt (s. Abb. 4). Da das ISG dafür verantwortlich ist, das Gewicht des Oberkörpers auf die unteren Extremitäten zu übertragen, ist ein starkes und stabiles gewichttragendes Gelenk mit geringer Beweglichkeit erforderlich (Schneider, 2021; Vleeming et al., 2012).

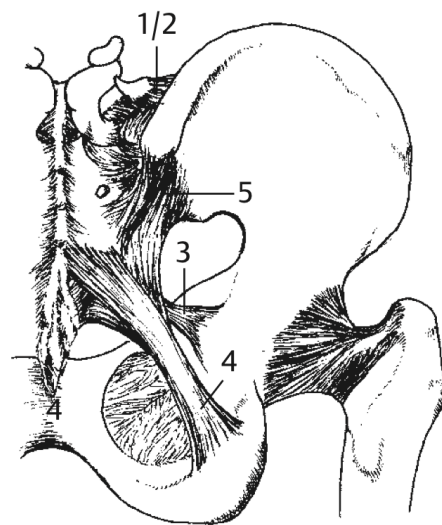


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bänder des Beckens von dorsal: 1/2 Lig. Iliolumbale, 3 Lig. sacrospinale, 4 Lig. sacrotuberale, 5 Ligg. sacroiliaca dorsalia

Die Sensibilität in diesem Bereich wird von einem Nervenplexus innerviert, der von seitlichen Ästen der hinteren Nerven von L5–S4 gebildet wird, was das Gelenk zu einem möglichen Schmerzgenerator macht. Maladaptive, kompensatorische Muster der motorischen Kontrolle, die auf ein Bemühen hindeuten, eine veränderte Lockerheit oder Festigkeit des Gelenks zu kompensieren, können zu Beckengürtelschmerzen führen. Die daraus resultierende Störung der Gelenkmechanik kann einen prädisponierenden Faktor für die Entwicklung degenerativer Prozesse im Gelenk darstellen.

Biomechanische Untersuchungen ergaben, dass eine lumbale Wirbelsäulenfusion zu einer erhöhten Beweglichkeit, sowie größeren Belastungen und Schmerzen im ISG führen können (K.-Y. Ha, Lee, & Kim, 2008; Ivanov, Kiapour, Ebraheim, & Goel, 2009). Die Ergebnisse einer Studie mit asymptomatischen

Freiwilligen und Patient:innen mit ISG-Schmerzen zeigt ebenfalls, dass schmerzhafte Veränderungen des ISG zu einer erhöhten Beweglichkeit führen können, während eine geringere Muskelquerschnittsfläche mit einer geringeren Beweglichkeit des ISG verbunden ist (Rashbaum, Ohnmeiss, Lindley, Kitchel, & Patel, 2016).

4.2 Diagnostik von Rückenschmerzen

Die Diagnostik bei unteren Rückenschmerzen ist häufig schwierig, da es vielfältige potenzielle Ursachen gibt. Es fehlen oft spezifische diagnostische Tests zur differenzierten Auswertung der Symptome, zumal Rückenschmerzen durch eine komplexe Wechselwirkung von Ursachen entstehen können. Hinzukommend werden Rückenschmerzen subjektiv und individuell wahrgenommen, und in einigen Fällen erfordert die Diagnosestellung einen Ausschluss von anderen Ursachen. Eine umfassende Bewertung durch qualifiziertes medizinisches Fachpersonal ist notwendig, um eine genaue Diagnose und ein angemessenes Management zu gewährleisten.

Zur Ersteinschätzung und Bestimmung der Therapieoptionen sind zunächst eine ausführliche Anamnese, eine gründliche körperliche Untersuchung und gegebenenfalls eine Blutuntersuchung unabdingbar. Bei Erstgenanntem sollte der Fokus auf den Schmerzcharakteristika liegen, insbesondere, aber nicht ausschließlich, auf der Schmerzqualität, -lokalisation und möglicherweise -ausstrahlung, -stärke und die Frage nach Linderung/ Provokation bei bestimmten Belastungen, Bewegungen, Atemmanövern oder Tageszeiten.

Auch nicht außer Acht zu lassen ist die Berücksichtigung von individuellen Risikofaktoren als häufige Ursachen, wie Übergewicht, Belastung im beruflichen und privaten Alltag, sowie sportliche Aktivitäten. Wichtiger Aspekt ist außerdem die Erhebung einer psychosozialen Anamnese, wie Stress, geringe Anerkennung oder häufige Arztbesuche. Dies kann auch für eine Chronifizierung hinweisgebend sein.

Hilfegebend bei der Einschätzung, ob (akuter) Handlungsbedarf besteht, können sogenannte *red flags* sein. Diese können bezeichnend sein für eine spezifische Ursache der Beschwerden und sollten daher immer abgefragt, beziehungsweise

untersucht werden. Beispielhaft zu nennen sind an dieser Stelle Frakturen nach schwerwiegenden Traumata, eine systemische Steroidtherapie, Immunsuppression oder starke nächtliche Schmerzen.

Leitliniengemäß erfolgt die, für die Diagnostik unentbehrliche körperliche Untersuchung des/r Betroffenen in einem der Anamnese angepasstem Ausmaß. Eine über die Basisdiagnostik hinausgehende Beurteilung sollte erfolgen bei anamnestischem Vorliegen von *red flags* oder dem Verdacht auf extravertebrale Ursache.

Eine Zusammenfassung der empfohlenen Auswahl klinischer Untersuchungen bietet Tabelle 1.

Tabelle 1: Auswahl empfohlener Basisuntersuchungen und weiterführender Untersuchungen bei Kreuzschmerzen (Bundesärztekammer (BÄK), 2017), LWS = Lendenwirbelsäule

Basisuntersuchungen bei Patienten mit Kreuzschmerzen	
Inspektion	Allgemeinzustand, körperliche Beeinträchtigung, Haltung, Beckenstand, Deformitäten, Verletzungszeichen, Haut
Palpation	der lokalen Muskulatur und der begleitend betroffenen Muskulatur auf Schmerzhaftigkeit und Verspannung
lokaler Druck- oder Klopfschmerz des Processus spinosus	bei V. a. Fraktur
orientierende Beweglichkeitsprüfung: Ante-, Retro-, Lateralflexion der LWS	Die diagnostische Aussagefähigkeit ist begrenzt, hilft aber beim Monitoring des Krankheitsverlaufes
Lasègue-Zeichen evtl. ergänzend Bragard-Test	Radikulopathie oder Nervendehnung
Untersuchung des sakroiliakalen Gelenks <ul style="list-style-type: none"> lokale Schmerzpalpation; Schmerzprovokation durch Kompression des Gelenkes. 	bei Schmerzangabe in der Glutealregion mit oder ohne ausstrahlende Schmerzen in den Oberschenkel (siehe auch weiterführende Untersuchungen)

Weiterführende Prüfungen umfassen den Finger-Boden-Abstand, das Schober-Zeichen, die Beweglichkeitsprüfung der Hüftgelenke, sowie orientierende Tests des Iliosakralgelenks. Bei neurologischer Begleitsymptomatik oder Vorliegen von *red flags* sollten ergänzend im Seitenvergleich die Muskelkraft der unteren Extremitäten nach Kraftgradskala, Sensibilitätsstörungen und Muskeleigenreflexe geprüft werden (Bundesärztekammer (BÄK), 2017). Weitere Ausführungen der in dieser Studie genannten Untersuchungen können dem Abschnitt *Material und Methoden* entnommen werden.

In der Mehrzahl der Publikationen zu dieser Thematik herrscht Einigkeit, dass bei *red flags* eine bildgebende Abklärung empfehlenswert ist. Bei akuten und rezidivierenden Kreuzschmerzen ohne entsprechende Hinweise auf gefährliche Verläufe oder andere ernstzunehmende Pathologien hingegen, rät auch die aktuelle Leitlinie des Ärztlichen Zentrums für Qualität in der Medizin von 2017, von einer bildgebenden Diagnostik ab. Wenn trotz leitliniengerechter Therapie nach vier bis sechs Wochen keine Besserung der Schmerzen eintritt, sollte allerdings eine radiologische Abklärung in Erwägung gezogen werden (Chenot et al., 2017).

4.3 Therapie von Rückenschmerzen

4.3.1 Konservative Therapie

Die adäquate Behandlung richtet sich nach der Ursache des Rückenschmerzes. Häufig wird zunächst eine konservative Therapie angestrebt, deren Fundament eine Analgesie, Muskelrelaxation und Physiotherapie bilden.

Dabei sollte auch der psychische Aspekt der Symptomatik nicht außer Acht gelassen werden. Studien weisen darauf hin, dass psychotherapeutische Behandlungsansätze sich bei Patient:innen mit unteren Rückenschmerzen positiv auf die Schmerzen, Funktionalität und auch die Erwerbstätigkeit auswirken. Bedeutend ist in diesem Zusammenhang insbesondere ein zeitnaher Therapiebeginn, um das Risiko der fortschreitenden Chronifizierung zu vermindern (Steffens et al., 2016).

Ebenso effektiv, wie notwendig ist eine Minimierung der Risikofaktoren. Diese sind v.a. Übergewicht und Bewegungsmangel. Die Untersuchung randomisierter klinischer Studien zur Prävention von unspezifischen unteren Rückenschmerzen im Jahr 2012 zeigt, dass die Kombination von sportlicher körperlicher Betätigung und Aufklärung, sowie Information über die Problematik wahrscheinlich das Risiko vermindern an unterem Rückenschmerz zu erkranken (Steffens et al., 2016). Die richtigen Übungen dienen dabei nicht ausschließlich zur Prophylaxe, sondern können auch bei akuten Beschwerden Abhilfe schaffen (Suh, Kim, Jung, Ko, & Ryu, 2019).

Die klinischen Leitlinien zur Therapie von unteren Rückenschmerzen, die im Auftrag der Weltgesundheitsorganisation (WHO) erstellt wurden, empfehlen einen

abgestuften oder stratifizierten Ansatz, mit dem die Behandlung an die individuelle Reaktion der Patient:innen auf vorherige Behandlungen oder Bemessungen zur Risikoanalyse angepasst wird. Die erste Stufe besteht in der Aufklärung, Aktivitätserhaltung und Gewissheit darüber, dass keine ernsthafte Pathologie vorliegt. Die zweite Stufe umfasst physikalische, psychologische und ergänzende Therapien, während die dritte Stufe eine multidisziplinäre Schmerzbehandlung beinhaltet. Die Verschreibung von Medikamenten, insbesondere Opioiden und injizierbaren Steroiden, wird vermieden, und Operationen werden nur im Rahmen von Studien durchgeführt (Traeger, Buchbinder, Elshaug, Croft, & Maher, 2019). Besonders herauszuheben ist hierbei, dass, abhängig von der Vielschichtigkeit der Symptomatik, Wert gelegt werden sollte auf nicht-chirurgische Behandlungsoptionen, unter Berücksichtigung der individuellen Reaktion der Patient:innen auf vorherige Behandlungen oder Risikovorhersageinstrumente, mit Schwerpunkt auf Aufklärung, Aktivitätserhaltung, multidisziplinäre Schmerzbehandlung und Vermeidung von Medikamentenverschreibungen.

4.3.2 Operative Therapie mittels Spondylodese

Die nationale Versorgungsleitlinie zur Versorgung von Kreuzschmerzen empfiehlt, dass bei erfolgloser nicht-invasiver Therapie für Kreuzschmerzen die Frage nach invasiven Maßnahmen aufkommen kann, unter der Voraussetzung, dass diese an überzeugende diagnostische Gründe gekoppelt sein müssen. Radiologische Befunde sollten vorsichtig interpretiert werden, da nicht jede degenerative Veränderung für den Patient:innen symptomatisch ist und eine invasive Therapie erfordert. Die Korrelation der objektivierbaren Degeneration mit der klinischen Symptomatik ist bei der Diskussion der Therapieform entscheidend. Abhängig von den therapeutischen und prognostischen Konsequenzen sollten diagnostische Entscheidungen dem/ der Patient:in kommuniziert werden, da das alleinige Wissen um eine strukturelle Diagnose ohne therapeutische Konsequenz zu unangemessener Schonung der Wirbelsäule führen kann. Operative Verfahren bei Kreuzschmerzen erfordern den Nachweis einer spezifischen Ursache. Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule sind nicht automatisch eine schmerzkausale Diagnose und erfordern die Korrelation mit dem klinischen Bild, das

entscheidend ist. Es gibt keine verlässlichen Daten für die Anwendung von operativen Therapieverfahren bei akuten und chronischen nicht-spezifischen Kreuzschmerzen (Bundesärztekammer (BÄK), 2017).

6.1.2.3 Epidemiologie

Deutschlandweit wird seit einiger Zeit eine stetig steigende Zahl von Krankenhausaufenthalten aufgrund von Wirbelsäulen- und Rückenerkrankungen verzeichnet. Bemerkenswert ist jedoch, dass die gestiegene Menge der Operationen an der Wirbelsäule weit über diesen Trend hinaus geht.

Zwischen 2007 und 2015 stieg die Anzahl der Krankenhausaufenthalte um 34 Prozent, während sich die Menge der operativen Eingriffe um auffallende 71 Prozent steigerte (Zich K., 2017). In der Tabelle, dargestellt in Tabelle 2, ist die Entwicklung der Prozedurenzahl zwischen 2007 und 2015 für alle vierstelligen Prozeduren der Gruppe „Operationen an der Wirbelsäule“ veranschaulicht. Zudem war eine jährliche Zunahme der dokumentierten Spondylodesen um etwa 6.000 zu beobachten, was einem Zuwachs von 57 % in diesem Zeitraum entspricht (Zich K., 2017).

Tabelle 2: Prozeduren aus der OPS-Gruppe 5-83: Operationen an der Wirbelsäule (Zich K., 2017), OPS = Operationen- und Prozedurenschlüssel

Jahre 2007 bis 2015; Bevölkerung im Alter ab 15 Jahren											
OPS	OPS-Bezeichnung Prozeduren in Tausend	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	relative Veränderung zwischen 2007 und 2015
5-830	Inzision von erkranktem Knochen- und Gelenkgewebe der Wirbelsäule	23	23	25	29	30	31	31	34	35	55 %
5-831	Exzision von erkranktem Bandscheibengewebe (ohne 5-831.6 und 5-831.7)	128	136	147	157	160	157	142	141	140	9 %
5-832	Exzision von erkranktem Knochen- und Gelenkgewebe der Wirbelsäule	73	83	91	99	105	108	108	110	110	51 %
5-833	Geschlossene Reposition der Wirbelsäule mit externer Fixation	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	-	-	-	-	-
5-834	Offene Reposition der Wirbelsäule mit Osteosynthese	18	20	20	22	24	-	-	-	-	-
5-835	Knochenersatz an der Wirbelsäule	48	64	85	104	125	43	41	43	44	-9 %
5-836	Spondylodese	46	52	59	65	71	71	70	72	72	57 %
5-837	Wirbelkörperersatz und komplexe Rekonstruktion der Wirbelsäule	7	8	8	9	10	10	10	10	10	42 %
5-838	Andere komplexe Rekonstruktionen der Wirbelsäule	2	2	2	3	3	3	3	3	3	46 %
5-839	Andere Operationen an der Wirbelsäule	97	117	137	151	163	168	169	178	183	88 %
dar. 5-839.6	Knöcherner Dekompression	48	61	76	90	98	102	102	108	111	130 %
5-83a	Minimal-invasive Behandlungs- verfahren an der Wirbelsäule (zur Schmerztherapie)	9	13	18	21	23	24	27	28	28	221 %
5-83b	Osteosynthese (dynamische Stabilisierung) an der Wirbelsäule	-	-	-	-	-	111	120	128	134	-
5-83w	Zusatzinformationen zu Operationen an der Wirbelsäule	-	-	-	-	-	8	9	10	12	-
Gesamt		452	519	593	660	713	734	730	758	772	71 %

Glassman et al. untersuchten und bestätigten die Wirksamkeit der lumbalen Dekompression und Fusion durch die Erhebung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität bei Patient:innen über 65 Jahren (Glassman et al., 2007) und bekräftigten damit die Positivität des Anstiegs an Prozedurenzahlen.

6.1.2.4 Indikationen

Insbesondere bei neurologischen Begleit-Symptomen, wie Muskelschwäche, Gefühlsstörungen oder Einschränkungen bei Miktion und Defäkation muss eine operative Therapie in Erwägung gezogen werden.

Laut Leitlinien der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) sind Spondylodesen empfohlen bei isthmischen

und degenerativen Spondylolisthesen, wenn keine zufriedenstellende konservative Therapie möglich ist. Persistierende Paresen sind als solche schwerwiegenden Problematiken zu nennen (Kroppenstedt S, 2018). Weitere Indikationen sind beispielsweise Radikulopathien in Folge einer Spinalkanalstenose, lumbale degenerative Wirbelsäulendeformitäten bei Spondylolistese oder degenerativer Skoliose (Mobbs, Phan, Malham, Seex, & Rao, 2015).

Die Indikationen für eine lumbale Spondylodese sind vielfältig. Hauptgrund ist eine Instabilität der betroffenen Segmente, wie z.B. aufgrund von Traumata, Tumoren, den bereits erwähnten Spondylodiszitiden oder Spondylolysen/-olisthesen. Sie können auch iatrogen durch Laminektomien oder Facettektomien entstehen. Sogenannte Mikroinstabilitäten, die nicht offensichtlich sind, kommen v.a. bei degenerativen Veränderungen vor, wie Osteochondrosen oder Bandscheibendegenerationen.

Genutzt wird dieses Verfahren außerdem zur Behandlung und Korrektur von Deformitäten wie Skoliosen, Kyphosen und Olisthesen oder auch zur Behandlung neuronaler Einengung, wie bei Spinalkanalstenosen oder foraminale Stenosen. Während der Operation kann hier eine Dekompression durch Vergrößerung der Foramina erfolgen (Schnake et al., 2019).

6.1.2.5 Operationsmethode

Die lumbale Spondylodese ist eine in der Wirbelsäulen Chirurgie fest etablierte Technik. In den letzten beiden Jahrzehnten hat sie sich erheblich weiterentwickelt, sodass dem Chirurgen heute nicht nur mehrere Zugangstechniken, sondern auch eine Vielzahl von Implantaten und Materialien zur Verfügung stehen, die im Rahmen dieser Arbeit näher erläutert werden. Bei der Spondylodese werden zwei oder mehr Wirbelkörper, in dieser Studie mindestens drei, mit dem Ziel einer dauerhaften Verknöcherung miteinander verbunden, also fusioniert. Die Spondylodese kann sowohl von posterior, anterior als auch lateral erfolgen und wird mittlerweile regelhaft mit Implantaten vollzogen (Schnake et al., 2019). In der großen Mehrzahl der Fälle wird sie mittels eines Pedikelschrauben-Stab-Systems durchgeführt, das auch als Fixateur interne bezeichnet wird. Ergänzend

kommen autologe oder allogene Knochen und/oder Knochenersatzstoffen zur Anwendung.

6.1.2.6 Dorsale Verfahren

Die aktuell verbreitetsten Fusionstechniken der dorsalen Spondylodese, die TLIF („transforaminal lumbar interbody fusion“) und PLIF („posterior lumbar interbody fusion“), unterscheiden sich u.a. in der Verwendung von (nur) einem Cage, der bei erstgenannter Methode transforaminal in das Bandscheibenfach eingebracht wird. Grundprinzip ist hierbei eine minimalinvasive unilaterale Exponierung des Bandscheibenraums unter Umgehung des Spinalkanals, wobei lediglich der laterale Anteil des Wirbelgelenks entfernt werden muss (Schnake et al., 2019).

Die PLIF ist eine 1944 erstmals beschriebene und lange etablierte Technik zur Wirbelsäulenfusion, bei der von beiden Seiten des Wirbelkanals jeweils ein Cage in den Zwischenwirbelraum eingefügt wird. Ein bemerkenswerter Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass ein solcher Eingriff, zu der Entlastung der Nervenstrukturen und einer umfassenden Wirbelsäulenversteifung, über einen einzigen Zugang erfolgen kann. Dadurch entfällt die Notwendigkeit von Positionierungsänderungen oder zusätzlichen chirurgischen Zugängen.

Die Erfordernis der ausgeprägten Duralschlauchretraktion ist jedoch mit der Gefahr einer Duraverletzung oder einer Nervenschädigung verbunden. Zudem muss bei der PLIF mit einem höheren Blutverlust als bei anderen Techniken gerechnet werden. Die Möglichkeit einer zusätzlichen Lordosierung ist ebenfalls beschränkt (Schnake et al., 2019).

Die in Tübingen präferierte Technik ist die TLIF, deren erste Beschreibung zur Behandlung einer Spondylolisthese auf Harms und Rolinger im Jahre 1982 zurück geht (Harms and Rolinger (1982)). Die interkorporale Fusion wird durch autologen Knochen und/oder Cages, meist Titankörbchen, sowie eine zusätzliche Stabilisierung mit Pedikelschraubensystemen erreicht.

Wie auch bei der PLIF besteht bei der TLIF die Gefahr von Dura- oder Nervenwurzelverletzungen. Es kann gelegentlich schwierig sein, die obere Nervenwurzel darzustellen und zu schützen. Auch das Ausräumen des

Bandscheibenfachs und die korrekte Platzierung des Cages können den Operateur vor Herausforderungen stellen. (Schnake et al., 2019).

Der Vorteil gegenüber anderen dorsalen Zugangswegen ist das geringere Risiko von Verletzungen des M. erector spinae, der Spinalnerven, der Dura mater und dem Ligamentum flavum. Durch das Erhalten von Ligamenten wird eine bessere biomechanische Stabilität gewährleistet als zum Beispiel bei der PLIF (Mobbs et al., 2015). Zudem ergibt sich eine verkürzte Operationszeit, ein geringerer Blutverlust und ein geringeres intraoperatives Risiko für Verletzungen der neuralen Strukturen, sowie die sonstigen allgemeinen Vorteile von minimalinvasiven Eingriffen. Durch den Erhalt der knöchernen kontralateralen Anteile steht zudem mehr Fläche für die dorsale Spondylodese zur Verfügung. Unter Abwägung all dieser Faktoren hat sich das TLIF-Verfahren aufgrund der einschlägigen Vorteile in vielen wirbelsäulenchirurgischen Zentren als Standardverfahren etabliert.

6.1.2.7 Ventrale Verfahren

Im Vergleich zu den dorsalen Verfahren der interkorporellen Fusion werden die ventralen Verfahren weniger häufig angewendet. Anatomische Herausforderungen beim Zugang sind die abdominalen Gefäße, sowie der Plexus lumbalis. Ein klassisches ventrales Verfahren ist die sogenannte "anterior lumbar interbody fusion" (ALIF), die eine entsprechende Gefäßpräparation erfordert und erstmals von Capener im Jahr 1932 beschrieben wurde. Seitdem wurde sie von verschiedenen Autoren fortentwickelt. Eine alternative Methode, letztendlich jedoch eine Abwandlung der ALIF, ist die "oblique lumbar interbody fusion" (OLIF), bei der ein schräg lateraler Zugang gewählt wird. Die Technik wurde 1997 von Mayer beschrieben und zielt auf eine Vereinfachung der Technik und der Minimierung des Risikos von Gefäßverletzungen ab. Bei der OLIF wird der Musculus psoas nach dorsal abgeschoben, um Zugang zum Bandscheibenfach zu erhalten. Sowohl ALIF als auch OLIF können minimal-invasiv oder klassisch offen durchgeführt werden, wobei ein Retraktorsystem notwendig ist.

Das XLIF-Verfahren („extreme lateral interbody fusion“) adressiert minimalinvasiv die zu instrumentierende Bandscheibe von streng seitlich mittels eines retroperitonealen Zugangs durch den Musculus psoas major. Erstmals wurde

2001 von Pimenta über diesen Zugangsweg als LLIF („lateral lumbar interbody fusion“) berichtet, der einen lateralen Eintritt ventral des Musculus psoas major bedeutet. Da der transpsoatische Zugang das Risiko einer Verletzung des lumbalen Nervenplexus birgt, sollte die Technik nur zusammen mit einem Neuromonitoring verwendet werden.

Eine Metaanalyse von Heemskerk et al. zur Bewertung der langfristigen klinischen Ergebnisse nach TLIF von Patient:innen mit degenerativen Erkrankungen der Lendenwirbelsäule zeigte eine signifikante Schmerzreduktion und positive Verbesserung des subjektiv wahrgenommenen Gesundheitszustands nach mindestens 2 Jahren (Heemskerk, Oluwadara Akinduro, Clifton, Quiñones-Hinojosa, & Abode-lyamah, 2021).

Die dorsalen Techniken werden am häufigsten angewendet, insbesondere wenn eine Dekompression des Spinalkanals oder der Foramina erforderlich ist. Die anterioren und lateralen Techniken eignen sich am besten, um die Höhe der Bandscheibenfächer und die Lordosierung des Segments wiederherzustellen. Die klinischen Ergebnisse aller Spondylodesetechniken sind gut und zeigen keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Fusionsraten. Es liegt im Ermessen des Chirurgen, die optimale Technik für die Pathologie der Patient:innen auszuwählen (Mobbs et al., 2015; Schnake et al., 2019). Einen Überblick der Zugangswege bietet die folgende Abbildung 5:

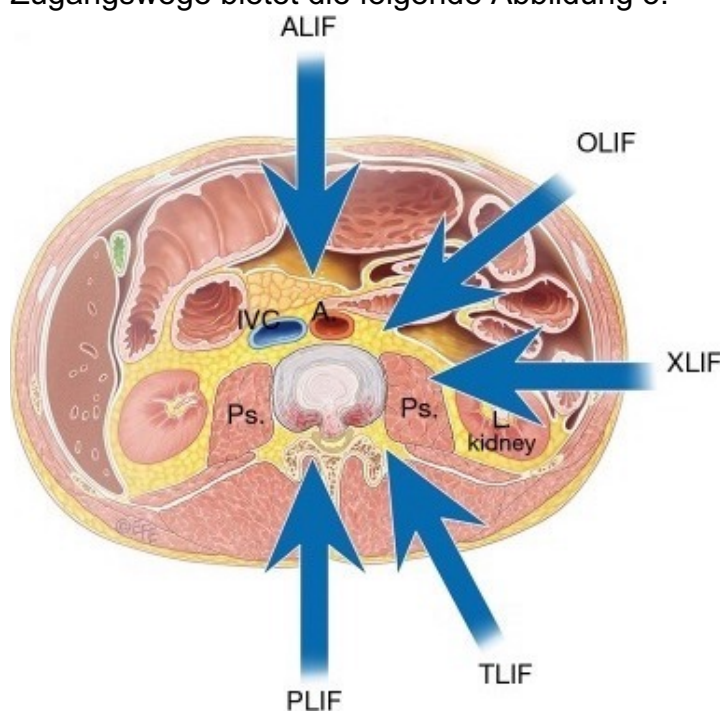


Abbildung 5: Chirurgische Zugangswege bei einer lumbalen Spondylodese. Darstellung der 5 primären Wege: anterior (ALIF), lateral oder extreme lateral interbody fusion (LLIF/ XLIF), oblique lumbar interbody fusion/anterior (OLIF), transforaminal (TLIF) und posterior (PLIF) (Mobbs et al., 2015)

6.1.2.8 Sakropelvine Fixierung: S2AI-Schrauben vs. Iliumschrauben

Eine Problemzone der Wirbelsäuleninstrumentation stellt aufgrund der regionalen Anatomie und des großen Hebeleffekts der lumbosakropelvinen Übergang dar, sodass die Ergebnisse nach Wirbelsäulenstabilisierung oft durch unzureichende Fixierung in diesem Abschnitt beeinträchtigt waren. Pseudarthrosen des Segments L5/S1 und die Lockerung der S1-Pedikelschrauben haben sich häufig als problematisch gezeigt. Probleme (Finger et al., 2014). Verschiedene Strategien der sakropelvinen Fixierung wurden entwickelt, um die Stabilität zu verbessern und Pseudarthrosen entgegenzuwirken. Zu den historischen Fixationstechniken des Beckens gehören Galveston-Stäbe, die intrasakrale Fixation nach Kostuik und die transiliakale Fixation nach Jackson.

Die Schrauben in S1 werden heutzutage von den meisten Wirbelsäulenchirurg:innen bei langstreckigen Konstrukten nicht mehr als allein verlässliche Technik favorisiert. Es gibt jedoch aktuell noch keinen eindeutigen Konsens über die Indikation oder die einzusetzenden Techniken. Häufig wird die basale Abstützung durch Schrauben im Bereich des Iliums ergänzt, um den hohen biomechanischen Anforderungen Rechnung zu tragen (Vajkoczy, 2019). Tis et al. verwendeten einen biomechanischen Ansatz, um vier verschiedene Techniken der lumbosakralen Fixierung zu vergleichen. Die untersuchten Gruppen repräsentierten Techniken, die verschiedene Kombinationen von Schrauben und Stäben, darunter die modifizierte Galveston-Technik, S1-Schrauben und iliakale Schrauben mit unterschiedlichen Verbindungen anwenden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verlängerung der Instrumentierung über den lumbosakralen Übergang mit S1-Schrauben und iliakaler Schraubenfixierung zu einer verbesserten Stabilität führen kann (Tis, Helgeson, Lehman, & Dmitriev, 2009). Auch Cunningham et al. empfehlen bei instrumentierten Fusionen, die sich über L3 hinaus erstrecken, eine Beckenfixation zur Stützung der Sakralschrauben mit zusätzlichen Iliakalschrauben durchzuführen (Cunningham et al., 2010). Etabliert ist die Platzierung der lumbopelvinen Schrauben nahe der Spina iliaca posterior inferior, mit dem Resultat einer starken Fixierung. Die eingeschränkte Beweglichkeit ist der Preis für die hohe Stabilität.

Die möglichen Variationen zur Beckenfixation liegen den am häufigsten angewendeten Methoden zugrunde, einerseits die Einbringung von Schrauben in das Ilium (IS = Iliumschrauben), alternativ die Verwendung von S2-Alar-Ilium-Schrauben (S2AI-Schrauben). Beide Schrauben zeichnen sich durch eine komplexe, oft nicht routinemäßig angewandte Trajektorie aus und erfordern eine präzise Platzierung der langen Schrauben, um ein biomechanisch stabiles Konstrukt zu garantieren. Der Hauptunterschied liegt in ihrer Platzierung und Ausrichtung. Die Iliumschrauben werden unabhängig von anderen Fixierungspunkten im Ilium platziert und erstrecken sich von der hinteren, oberen Darmbeinschaukel bis zur vorderen, unteren Darmbeinschaukel (s. Abb. 6b). Die Schrauben werden dann mit Offset-Verbindern mit den längs verlaufenden Stangen verbunden. Im Gegensatz dazu haben die S2AI-Schrauben einen Startpunkt entlang der S1-Pedikelschraube am S2-Alar. Der Bohrkanal verläuft innerhalb von 20 mm proximal zum großen Hüftbeinloch und zielt auf die vordere, untere Darmbeinschaukel ab (s. Abb. 6 a).

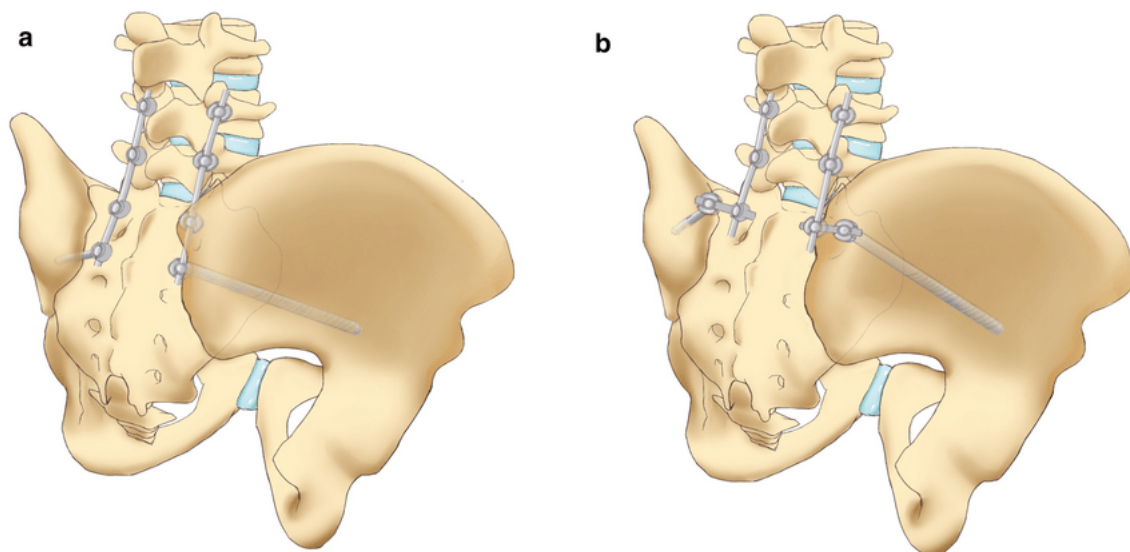


Abbildung 6: Schematische Darstellung von S2AI-Schrauben (a) und Iliumschrauben (b) (Gao et al., 2021)

Die Platzierung der IS kann jedoch zu Schraubenprominenz und Wundkomplikationen führen. Als vorteilhaft sind bei Verwendung von S2AI-Schrauben der geringere Gewebeschaden und die verbesserte biomechanische Festigkeit zu nennen. In einer biomechanischen Studie zur Stabilitätsevaluation bei Flexion,

Extension, Rotation, lateraler Biegung und axialer Rotation beider Optionen konnte außerdem gezeigt werden, dass kein statistisch signifikanter Unterschied in den Steifigkeitsmessungen zwischen der S2AI-Schraubenfixierung und der Iliosakral-schraubenfixierung existiert (Hoernschemeyer, Pashuck, & Pfeiffer, 2017). Eine systematische Überprüfung und Metaanalyse von Patient:innen mit Wirbelsäulenversteifung mit oder ohne Ilios-schrauben von Han et al. ergab, dass die klinischen Ergebnisse in der IS-Gruppe ähnlich denen in der Nicht-IS-Gruppe waren, aber die Anwendung von IS die lumbale Lordose signifikant wiederherstellte, Dekompensation verhinderte und das Auftreten von distaler Instrumenteninstabilität reduzierte. Daher können IS eine gute Wahl für die operative Behandlung bei sagittaler Fehlstellung und anderen Risiken wie lumbosakraler Fraktur, Metallbruch und Schraubenausriss sein (Han et al., 2021). Zhong et al. dagegen zeigten, dass die Operationszeit und der geschätzte Blutverlust bei der S2AI-Schrauben-Gruppe signifikant niedriger im Vergleich zur IS-Gruppe war, jedoch beide Gruppen signifikante Verbesserungen bei der visuellen Analogskala (VAS) und dem Oswestry Disability Index (ODI) von präoperativ bis zur letzten Nachuntersuchung aufwiesen. Die Inzidenz von Schmerzen im Iliosakralgelenk war in beiden Gruppen während des Nachbeobachtungszeitraums ähnlich (Zhong et al., 2023).

Die Schlussfolgerung der Studie besagt, dass sowohl die S2AI-Schrauben- als auch die IS-Techniken vielversprechende Ergebnisse zur Wiederherstellung der lumbosakralen Stabilität bei Spondylodiszitis liefern können. Darüber hinaus kann die S2AI-Schrauben-Technik das Operationstrauma und die Operationszeit reduzieren.

Klinisch und funktionell verzeichneten Elder et al. ähnliche Ergebnisse zwischen den beiden Verschraubungsmöglichkeiten. Die Verwendung der S2AI-Schrauben wird jedoch als ein unabhängiger Prädiktor für die Verhinderung von Reoperationen und Wundinfektionen angesehen (Elder et al., 2017). Die Ergebnisse der Studie von Ilyas et al. demonstrieren, die deutliche Überlegenheit von S2AI-Schrauben bei klinischen und röntgenologischen Komplikationen gegenüber Ilios-schrauben (Ilyas, Place, & Puryear, 2015). Radiologische Bewertungen der globalen spinalen Ausrichtung werden zunehmend anerkannt. Frühere

Metaanalysen zeigten eine signifikant niedrigere Inzidenz von postoperativen Komplikationen bei der Verwendung von S2AI-Schrauben im Vergleich zu IS. Es ist jedoch wichtig, nicht nur die statistische Signifikanz, sondern auch die klinische Bedeutung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Daher ist eine umfassende statistische Quantifizierung der Inzidenz von postoperativen Komplikationen in beiden Gruppen ausschlaggebend (Gao et al., 2021).

Die Wiederherstellung des Wirbelsäulenalignments spielt eine entscheidende Rolle bei der Remodeling-Balance anlässlich der Behandlung von spinalen Deformitäten. Im Zentrum steht die Ausrichtung der Wirbelsäule in seitlicher Betrachtungsweise mit Auswirkungen auf die Stabilität und die Funktionalität und damit das Wohlbefinden der Patient:innen, denn ein Abweichen von der normalen Krümmung der Wirbelsäule kann zu ungleichmäßiger Belastung der Wirbelkörper, Bandscheiben und Gelenke führen. Dies wiederum steigert die Wahrscheinlichkeit von Schmerzen, Verschleiß und Instabilität und letztendlich das Risiko einer Fehlfunktion oder eines Versagens der Fusion. In der Fusionschirurgie kann das sagittale Alignment grundsätzlich durch verschiedene Techniken wiederhergestellt werden, wie z.B. die Verwendung von intervertebralen Käfigen, Wirbelkörperersatz und Wirbelsäuleninstrumentation, um die Wirbelsäule in der gewünschten Ausrichtung zu fixieren und zu stabilisieren.

Die Bedeutung des sagittalen Alignments in der Fusionschirurgie wird auch durch die Ergebnisse von Studien gestützt. Eine Literaturrecherche von 2015 zur Messung radiologischer Becken- und Wirbelsäulenparameter zur sagittalen Gleichgewichtsanalyse bei degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen kommt zu dem Ergebnis, dass die theoretischen pelvic tilt (PT) und sacral slope (SS) Werte für einen bestimmten pelvic incidence (PI) Wert vor dem Eingriff bekannt sein müssen, um perioperativ den entsprechenden Wert der lumbalen Lordose (LL) wiederherzustellen. Insbesondere die Wiederherstellung der LL ermöglicht eine Vorwärtsrotation des Beckens, um zu den physiologischen PT- und SS-Werten zurückzukehren, da PI ein konstanter anatomischer Parameter ist (J.-C. Le Huec, Faundez, Dominguez, Hoffmeyer, & Aunoble, 2015). Genauere Beschreibungen sind dem Abschnitt „Material und Methoden“ zu entnehmen.

6.1.2.9 Komplikation: Postoperative Schmerzen des Iliosakralgelenks

Die Verwendung von S2AI-Schrauben ist eine sichere und wirksame Ergänzung zur Behandlung verschiedener komplexer Wirbelsäulenerkrankungen, einschließlich Fusionen langer Segmente. Die Ergebnisse hinsichtlich Funktion und Schmerzen sind zufriedenstellend, biomechanische Studien zeigten jedoch eine erhöhte Belastung des Iliosakralgelenks nach einer lumbalen Spondylodese.

Katz et al. beschrieben erstmals detailliert, dass unter den retrospektiv Untersuchten mit Kreuzschmerzen nach lumbosakraler Fusion bei 32 % das Iliosakralgelenk definitiv die Schmerzursache und bei 29 % möglicherweise die Schmerzursache war (Katz, Schofferman, & Reynolds, 2003).

Chronische Rückenschmerzen nach lumbaler Wirbelsäulenversteifung treten häufig auf und führen zu Beeinträchtigungen der Lebensqualität. Patient:innen mit Schmerzen des Iliosakralgelenks geben an, dass ihre Lebensqualität im Vergleich zu Patient:innen mit anderen chronischen Erkrankungen besonders niedrig ist (Aranke et al., 2022). Zudem führen sie auch zu erheblichen volkswirtschaftlichen Belastungen. Untersuchungen in Großbritannien ergaben anhaltende Schmerzen bei mehr als einem von fünf Patient:innen nach Lumbaloperationen, was, hochgerechnet auf die britische Bevölkerung, fast 5.000 Erwachsene jährlich bedeutet. Dies verursacht erhebliche langfristige Gesundheitskosten, denn jede neue Kohorte kostet das britische Gesundheitssystem allein in den ersten 10 Jahren umgerechnet über 80 Millionen Euro (Weir et al., 2017).

Auch in den Vereinigten Staaten von Amerika werden chronische Kreuzschmerzen zu einer teuren Erkrankung, die es zu behandeln gilt. Es wird geschätzt, dass 10 bis 40 % der Patient:innen nach der chirurgischen Behandlung anhaltende Schmerzen haben und mit dem Failed Back Surgery Syndrome diagnostiziert werden, bei geschätzten Gesundheitskosten von bis zu 20 Milliarden Dollar jährlich (Elsamadicy et al., 2017).

Allerdings haben nur wenige Studien die Inzidenz von postoperativ neu auftretenden Schmerzen des Iliosakralgelenks untersucht. Dies kritisieren auch Shen

et al. in ihrer systematischen Übersichtsarbeit und kamen zu dem Schluss, anhaltende Schmerzen nach Operationen an der Lendenwirbelsäule seien möglicherweise auf das Iliosakralgelenk zurückzuführen, die aktuelle Literatur zu dieser Fragestellung sei jedoch von schlechter Qualität (Shen et al., 2023). Eine Analyse verschiedener Studien ergab, dass die Prävalenz von Schmerzen des Iliosakralgelenks bei Patient:innen mit Rückenschmerzen nach lumbaler bzw. lumbosakraler Fusion im Bereich von 16 bis 43 % liegt (Yoshihara, 2012). Manzetti et al. sprechen von 3 bis 90 % und schlussfolgern aus ihren Untersuchungen, dass Patient:innen nach lumbosakraler Fixation einem erhöhten Risiko für ISG-Schmerzen ausgesetzt sind (Manzetti et al., 2022). Unoki et al. beobachteten eine Inzidenz von 10,7 % neu aufgetretener ISG-Schmerzen bei Patient:innen nach lumbosakraler Fusion (Unoki, Abe, Murai, Kobayashi, & Abe, 2016). Yu Chau Lee et al. kamen zu einer Inzidenz von 12 % (Y. C. Lee, Lee, & Harman, 2019). Auch Kalidindi et al. zeigten, dass neu aufgetretene Schmerzen des Iliosakralgelenks mit einer Inzidenz von 9,6 % eine signifikante Morbiditätsursache nach TLIFs darstellen (Kalidindi, Bansal, Vishwakarma, & Chhabra, 2021). Ha et al. kommen zur gleichen Zahl von 9,6 % (8/83) der Patient:innen mit Schmerzen um das Iliosakralgelenk auf Palpation oder Kompression nach langstreckiger Fusion mit S2AI-Schrauben über mindestens 6 Segmente in OLIF- oder TLIF-Technik (A. S. Ha et al., 2022).

Finger et al. hingegen konnten in ihrer retrospektiven Studie keinen Einfluss einer sakropelvinen Fixationstechnik auf die ISG-Schmerzen bei Patient:innen mit degenerativer Wirbelsäulenerkrankung nach mehrsegmentaler Versteifungsoperation verzeichnen (Finger et al., 2016).

Eine retrospektive Studie von 2019, ergab nachstehende Untersuchungsergebnisse von 77 Patient:innen (Unoki et al.) und deutete damit an, dass die Versorgung mit S2AI-Schrauben eine Verringerung der postoperativen ISG-Schmerzen bedeuten könnte.

Tabelle 3: Studienergebnisse von (Unoki et al., 2019)

Ort bzw. Art der Verschraubung	Proband:innen mit Schmerzen des ISG nach lumbaler Spondylodese über mind. 3 Segmente	Anzahl der Proband:innen (n)
Os sacrum	26,1 %	23
L5	16,7 %	30
S2AI-Schrauben	4,1 %	24

Die Ätiologie von iliosakralen Schmerzen nach einer Wirbelsäulenfusion ist komplex und kann mit Veränderungen in der Biomechanik und einer erhöhten Belastung des Iliosakralgelenks aufgrund der Bewegungseinschränkung auf den fusionierten Ebenen zusammenhängen. Dies umfasst Bänder- oder Kapselspannung, externe Kompressions- oder Scherkräfte, Hypomobilität oder Hypermobilität, abweichende Gelenkmechanik und Ungleichgewichte in der myofaszialen oder kinetischen Kette. Andere Faktoren, die zur Entwicklung dieser Schmerzen beitragen, sind Facettengelenksarthritits, Erkrankung benachbarter Segmente und Infektionen (Yoshihara, 2012).

Ivanov et al. untersuchten anhand eines Modells die Winkelbewegung des Kreuzbeins und die Belastung über das ISG nach dorsalen Fusionen der Lendenwirbelsäule. Die Ergebnisse zeigten, dass die dorsale Fusion der Lendenwirbelsäule zu einer erhöhten Bewegung am Iliosakralgelenk und zu einer erhöhten Belastung der Gelenkflächen führt. Kleine Bewegungssteigerungen können Schmerzen auslösen, da die Bänder um das Iliosakralgelenk reich innerviert sind (Ivanov et al., 2009).

Onsel et al. stellten mittels Szintigrafie fest, dass bei Patient:innen nach lumbaler Wirbelsäulenfusion und/oder Laminektomie eine erhöhte Aufnahme der radioaktiven Marker an den Iliosakralgelenken zu verzeichnen war, somit auf erhöhte Stoffwechselaktivität hindeutet, was die Autor:innen auf eine veränderte Wirbelsäulenmechanik und infolgedessen mechanische Überlastung und Sakroiliitis zurückführten (Onsel et al., 1992).

Frymoyer et al. deduzieren hingegen aus ihren Untersuchungen der langfristigen Auswirkungen der Wirbelsäulenfusion auf die Funktion des Iliosakralgelenks, dass weder biomechanische noch anatomische Veränderungen bei

Fusionspatient:innen vorliegen und anhaltende Schmerzen eher Teil eines gesamten Schmerzkomplexes ausgehend von der Lendenwirbelsäule sind (Cohen, 2005; Frymoyer et al., 1978).

Insgesamt machen mehrere Studien Schwierigkeiten bei der Erfassung der Schmerzen der Iliosakralgelenke deutlich, unter anderem da es viele potenzielle Quellen für Gesäßschmerzen gibt (Hyun, Rhim, Kim, & Kim, 2010). In Deutschland gibt es bisher keine vergleichbare Studie. Weitere Untersuchungen sind dringend erforderlich, um die volkswirtschaftliche und physische Belastung durch postoperative chronische Rückenschmerzen zu reduzieren.

4.4 Fragestellung

Dorsale Spondylodesen eine sehr häufig durchgeführte Operation in der Wirbelsäulenchirurgie. Bei langstreckigen Versorgungen stellt sich die Frage nach einer Versorgung mit oder ohne Verschraubung auf das Ilium. Die beiden Optionen einer chirurgischen Versorgung mit S2-Iliumschrauben oder ohne Iliumschrauben werden in dieser Studie untersucht. Primäres Ziel ist es herauszufinden, ob es einen klinischen Unterschied zwischen dem Schmerzempfinden bei operierten Patient:innen gibt, mit besonderem Fokus auf das Iliosakralgelenk. Des Weiteren soll die Wirksamkeit der sakropelvinen Fixierung mit S2AI-Schrauben als vorbeugende Maßnahme für Iliosakralgelenkschmerzen nach einer lumbalen Wirbelsäulenfusion, wie sie in verschiedenen Studien vorgeschlagen wurde, bewertet werden. Dies umfasst die Beurteilung der Inzidenz von Iliosakralgelenkschmerzen und der funktionellen Ergebnisse bei Patient:innen, die sich diesem Verfahren unterziehen, und den Vergleich der Ergebnisse bei Patient:innen, die das Verfahren nicht erhalten. Obwohl diese Technik in vielen chirurgischen Zentren verwendet wird, ist ihre Wirksamkeit bei der Vorbeugung von Schmerzen im Iliosakralgelenk nach einer multisegmentalen lumbalen Wirbelsäulenfusion bislang nicht ausreichend belegt.

Die Hypothese für diese Arbeit lautet wie folgt: Patient:innen mit dorsalen Spondylodesen über mindestens 3 Segmente erleben nach Verschraubung mittels S2AI-Schrauben seltener Schmerzen des Iliosakralgelenks als Patient:innen mit Verschraubung an das Os sacrum.

Grundlage dieser Studie ist die Befassung mit den nachstehenden Fragestellungen zur Verifizierung/ Falsifizierung der Hypothese:

1. Haben die unterschiedlichen Verschraubungstechniken ein unterscheidbar hohes Risiko für postoperative Schmerzen des Iliosakralgelenkes?
2. Ermöglicht eine Verschraubung mit S2AI-Schrauben radiologisch ein besseres sagittales Alignment sowie eine positive Veränderung der spinopelvinen Parameter?
3. Sollten solche Verbesserungen bestätigt werden: Führen sie auch zu überlegenen Ergebnissen in der weiterführenden klinischen Untersuchung?
4. Verschlechtert eine vorangegangene Operation das Outcome im Vergleich zu Patient:innen ohne Voroperation?

In ihrem Ergebnis soll diese Studie einen Beitrag zur chirurgischen Entscheidungsfindung und zur Empfehlung einer der beiden Verschraubungsmöglichkeiten mit dem Ziel der Verbesserung der Behandlungsergebnisse, vornehmlich der Prävention von Schmerzen des Iliosakralgelenks nach multisegmentalen Spondylodesen leisten. Die Ergebnisse dieser Studie sollen dazu beitragen, die Entwicklung evidenzbasierter Richtlinien für die Behandlung von Schmerzen im Iliosakralgelenk nach einer lumbalen Wirbelsäulenversteifung zu unterstützen, und können zu einer breiteren Anwendung der sakropelvinen Fixierung mit S2AI-Schrauben als vorbeugender Maßnahme führen.

5 Material und Methoden

5.1 Studiendesign

Es handelt sich um eine klinische retrospektive Studie mit prospektiven Anteilen. Dabei wurden 30 Proband:innen erfasst, die seit November 2014 an der Orthopädischen Universitätsklinik in Tübingen mit einer langstreckigen (≥ 3 Segmente) Spondylodese bis S1, mit oder ohne S2-Ala-Iliumverschraubung versorgt wurden. Die Vergleichsgruppen wurden auf Outcomes im Hinblick auf die Operationsmethode untersucht.

Zur Auswahl der Proband:innen wurden sämtliche von PD Dr. med. Christian Walter durchgeführte Wirbelsäulenoperationen im angegebenen Zeitraum auf

Ein- und Ausschlusskriterien geprüft. Folgende Einschlusskriterien mussten zur Teilnahme an der Studie erfüllt sein:

1. Proband:innen, die zwischen dem 01.11.2014 und dem 31.10.2021 mit einer dorsalen Spondylodese bis S1 mit oder ohne S2-Ala-Iliumverschraubung versorgt wurden.
2. Die Spondylodese erfolgte langstreckig, über mindestens 3 Segmente.
3. Eine unterschriebene Einwilligungserklärung nach Aufklärung zu der Studie lag vor.
4. Volljährigkeit zum Zeitpunkt der Operation.

Folgende Kriterien führten zum sofortigen Ausschluss aus der Studie:

1. Proband:innen mit fehlender Einwilligungsbereitschaft.
2. Proband:innen, deren Operationsindikation eine Infektion zugrunde liegt.

Die Durchführung der Proband:innenrekrutierung nach bereits stattgefundenen Eingriffen, die zum Teil lange Zeit zurücklagen, brachte es mit sich, dass die zur Verfügung stehenden Patient:innen und deren Bereitschaft zur Mitarbeit nur eine kleine Fallzahl erwarten ließen. Zunächst wurden alle Patient:innen, den Ein- und Ausschlusskriterien folgend, telefonisch kontaktiert und zur Studienteilnahme eingeladen. Dies umfasste 96 Patient:innen. Aufgrund von geringer Teilnahmebereitschaft, insbesondere wegen der verbreiteten Sorge vor Ansteckung im Klinikum mit SARS-CoV-2, betrug die Rücklaufquote dementsprechend nur 31,25 %.

Die Ethik-Kommission an der Medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität und am Universitätsklinikum Tübingen genehmigte die vorliegende Studie mit der Projekt-Nummer 765/2019BO2 am 27.12.2019.

Die Daten wurden mittels Suchanfrage aus digital archivierten Arztbriefen und Berichten sowie durch Einsicht in die entsprechenden Krankenakten gewonnen. Den Daten der Proband:innen wurde in einer separaten Tabelle jeweils eine ID zugeordnet, sodass die untersuchten Parameter in eine pseudonymisierte Tabelle übertragen werden konnten. Die erfassten Daten können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Erfasste Daten dieser Studie

Proband:innencharakteristika	Geschlecht Geburtsdatum Alter bei Operation Vorerkrankungen Medikation Voroperationen der Wirbelsäule
Operationscharakteristika	Operationsindikation Operationsdatum Operationsmethode (mit/ohne S2AI-Schrauben, Anzahl versteifter Segmente)
Erhobene Parameter	Radiologische Parameter Daten aus der Fragenbogendiagnostik Daten aus der klinischen Untersuchung

Für die Datenverwaltung kam *Microsoft Excel für Mac*, Version 16.42 zur Anwendung. Jedem Merkmal ist ein Kürzel zugeordnet und bei qualitativen Merkmalen jeder Merkmalsausprägung eine Zahl.

5.2 Operationsmethode

Die angewandte Operationstechnik orientierte sich an den allgemeinen Standards der TLIF, detaillierte Beschreibungen folgen in den nächsten Abschnitten.

5.2.1 Vorbereitung

Zur Aufklärung der Patient:innen zur Operation gehörte neben der Darstellung der allgemeinen Risiken des Eingriffs hier auch, dass im Falle eines Materialversagens weiterhin eine Pseudarthrose im Bereich von L5 und S1 entstehen kann. Eine Bildgebung zur Planung des Verfahrens umfasst bevorzugt Röntgenaufnahmen im Stehen in 2 Ebenen, sowie gegebenenfalls die Durchführung einer Computertomografie (CT) oder Magnetresonanztomografie (MRT) zur Beurteilung der (lumbalen) spinalen Parameter an (s. radiologische Auswertung).

Die Operation erfolgt in Intubationsnarkose. Der Betroffene wird in Bauchlage mit maximaler Streckung der Hüften auf Polstern auf den strahlendurchlässigen Operationstisch gelegt, um eine physiologische Lordose der Lendenwirbelsäule aufrechtzuerhalten. Gleichzeitig führt diese Lagerung zu einer Dekomprimierung des Abdomens, um eine venöse Stauung zu vermeiden. Die für den Zugang bei TLIF auszuwählende Seite der Wirbelsäule basiert auf präoperativen Symptomen. Wenn beispielsweise ein überwiegend einseitiger Bandscheibenvorfall oder eine foraminale Stenose vorliegt, wird die betroffene Seite gewählt. Falls angezeigt, wird dann eine zentrale Dekompression durchgeführt. Andererseits kann im Falle von einseitigen Voroperationen jedoch auch die Gegenseite als Zugang herangezogen werden. Die korrekte Segmentebene wird mittels Röntgenaufnahmen festgestellt. Anschließend erfolgen die erforderlichen hygienischen Maßnahmen, wie die Desinfektion und das sterile Abdecken.

5.2.2 Durchführung

Es erfolgt ein typischer dorsaler Zugang mittels Hautschnitt median über den markierten Processus spinosi. Diesem schließt sich die Inzision der Fascia thoracolumbalis und Abpräparation der autochthonen Rückenmuskulatur von den Processus spinosi und der Lamina arcus vertebrae mit dem elektrischen Messer an. Anschließend folgt die Präparation und Darstellung der Facettengelenke, bis auf den Processus transversus. Um transforaminal Zugang zu haben, muss bei diesen Eingriffen gelegentlich das gesamte Facettengelenk reseziert werden und hierzu sowohl die obere Nervenwurzel im Neuroforamen als auch die untere abgehende Nervenwurzel dargestellt werden. Es handelt sich in diesem Fall also um eine Facettektomie, eine knöcherne Entdachung des Neuroforamens. Dabei werden mit einem Osteotom die kaudale Facette des kranialen Wirbels, sowie die kraniale Facette des kaudalen Wirbels entfernt.

Die pathologisch entarteten und vergrößerten Facettengelenke werden mit einem Meißel reseziert. Der erhaltene Knochen wird zerkleinert und später als Wirbelsäulenfusionsmaterial abgelagert, sowie zum Füllen des Cages verwendet.

Im Zuge dieses Einschnitts wird auch ein Beckenkamm freigelegt und gefensternt, um eine ausreichende Menge Spongiosa für das Knochentransplantat zu erhalten. Die Faszie über dem Beckenkamm wird mit Einzelknopfnähten verschlossen. Für die Operationen werden Polyaxialschrauben des EXPEDIUM® Wirbelsäulensystems der Firma DePuy Synthes verwendet. Die Präparation der Pedikel erfolgt mit einer Auswahl an Ahlen, Pfriemen, Sonden und Gewindeschneidern, die zur Bestimmung der korrekten Schraubenlängen kalibriert sind. Mehrachsige Pedikelschrauben werden in den entsprechenden Mengen durch Freihandtechnik mithilfe eines Schraubendrehers eingesetzt. Dabei muss auf eine lineare Ausrichtung der Schrauben geachtet werden. Die roten Kreise in Abbildung 7 zeigen die Positionierung. Die korrekte Platzierung wird durch biplanare Fluoroskopie und direkte Stimulation der Schrauben bei Aufzeichnung der elektromyographischen Reaktionen in den benachbarten Nervenwurzeln abgesichert.

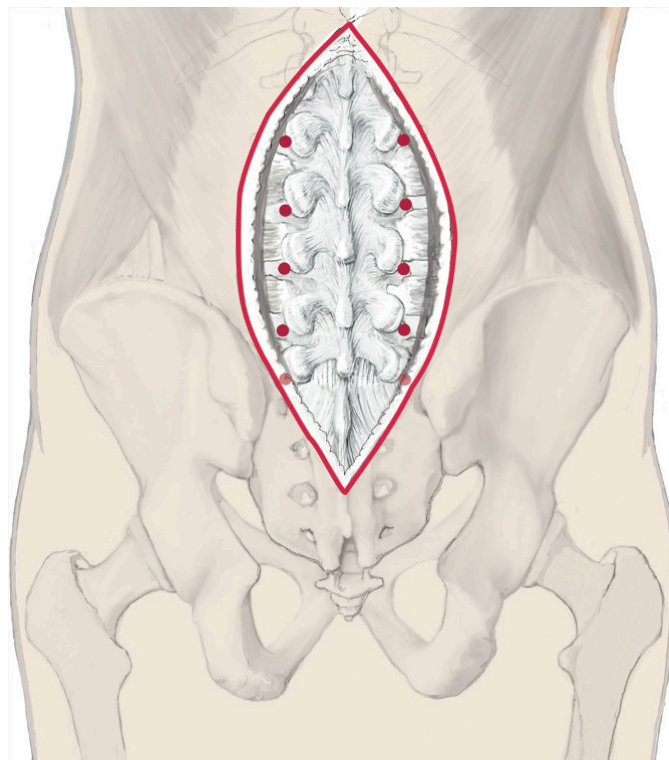


Abbildung 7: Platzierung der Pedikelschrauben (Lattig & Weckbach, 2017)

Ein transforaminaler Zugang zum Bandscheibenfach wird durch die Durchtrennung des hinteren Längsbandes geschaffen. Erleichternd wirkt sich dabei das Entfernen des Ligamentum flavum und des darunter liegenden Fettgewebes aus.

Im Ablauf der Operation kann es an dieser Stelle zum Auftreten von epiduralen Blutungen kommen, zu deren Kontrolle beispielsweise die bipolare Elektrokauterisation angewendet werden kann.

Es erfolgt ein Aufspreizen des Bandscheibenfaches über das Foramen intervertebrale und zunächst die Retraktion des Duraschlauchs. Der Anulus fibrosus wird oberhalb des Pedikels inzidiert, dieser muss zum Erhalt der Stabilität des T-TPAL Implantats erhalten bleiben, und das Bandscheibenmaterial mit Hilfe von Küretten und Schabern ausgeräumt (s. Abb. 8).

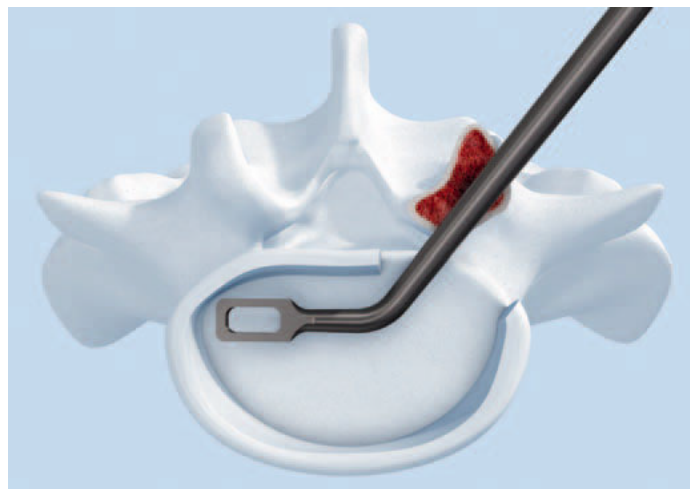


Abbildung 8: Entfernung des Bandscheibenmaterials mit abgewinkelter Knochenkürette (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012)

Es folgt das Vorbereiten des Bandscheibenraums. Dieser wird mit Kochsalzlösung gespült und dann erneut überprüft, um die ausreichende Entfernung des Bandscheibenmaterials zu bestätigen. Es schließt sich die Entfernung der oberflächlichen Knorpelschichten der Endplatten mit einer Raspel zur Vorbereitung als Transplantatbett an. Zuvor bei der Dekompression gewonnenes Knochen- transplantat, gemischt mit lokalem Knochen oder alternativ synthetischen Knochenersatzmaterial, wird dann mit einem Impaktor dicht in den anterioren und lateralen Bandscheibenraum gepackt.

Die Versorgung der kontralateralen Seite erfordert die Verwendung speziell gebogener Küretten, Löffel und Raspeln und erfolgt in analoger Technik.

Der Cage wird dann mit Autotransplantat gepackt, in den Bandscheibenraum eingeführt und platziert (s. Abb. 9). Anschließend folgt das Auffüllen des Raums mit Knochen- oder Knochenersatzmaterial.

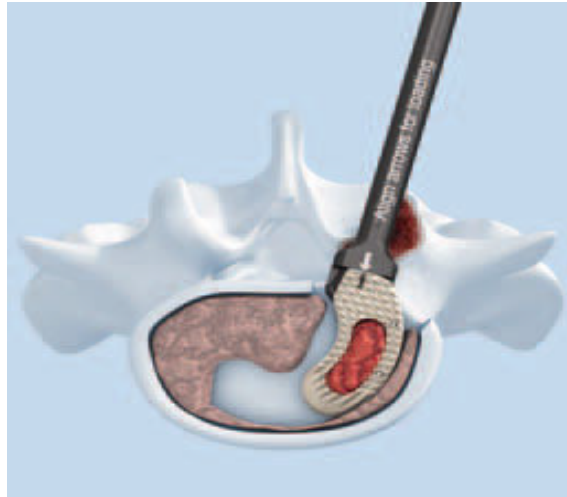


Abbildung 9: Einbringen des Cages (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012)

Im Falle einer geplanten Verschraubung auf das Ilium, wird die folgende Technik angewandt: Nach dem Einsetzen der Pedikelschrauben erfolgt das Aufsuchen des Insertionspunktes in einer gedachten Verbindungslinie der lumbalen und sakralen Schrauben. Zu diesem Zweck wird mit einem Pfriem die Mitte der dorsalen Foramina von S1 und S2 ertastet (s. Abb. 10 a) Von hier ausgehend 5 bis 10 mm nach lateral befindet sich der optimale Eintrittspunkt (s. Abb. 10 c). (Yilmaz et al., 2018) Die Pedikelschraube von S1 sollte sich in einem Winkel von 70° - 100° zur S2-Ala-Iliumschraube befinden (s. Abb. 10 b).

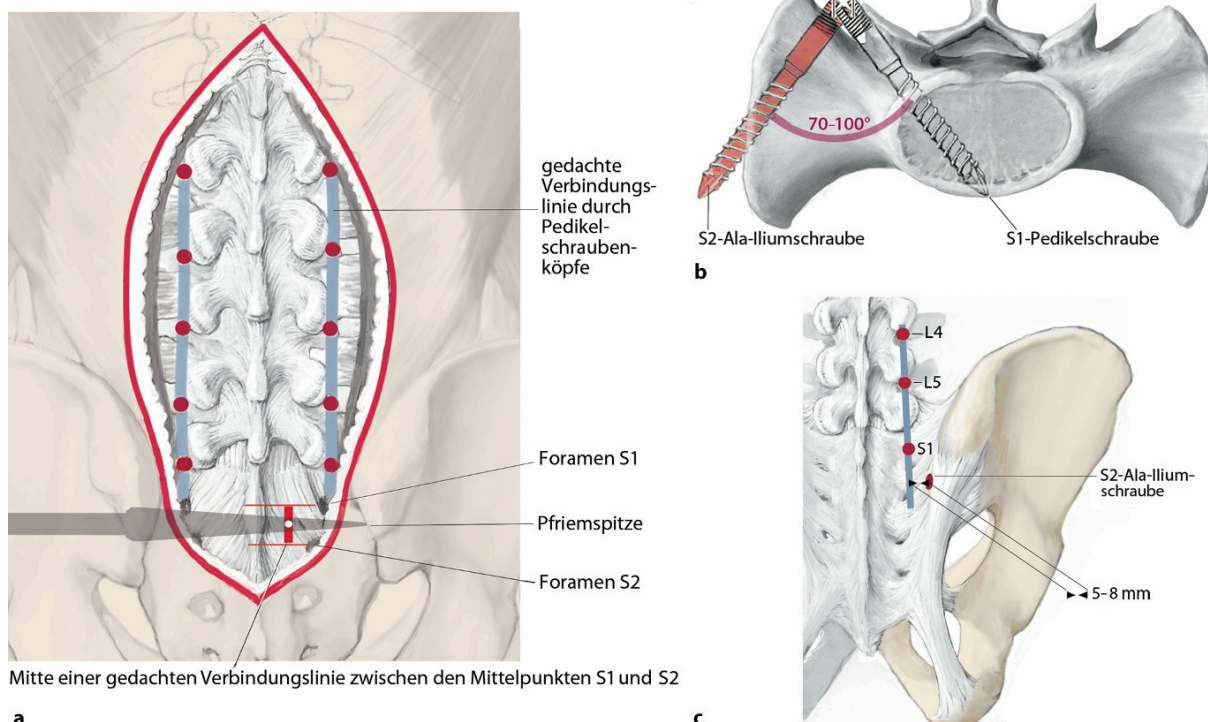


Abbildung 10: Platzierung der S2AI-Schrauben (Lattig & Weckbach, 2017)

Der Pfriem zielt auf die Spitze des ipsilateralen Trochanter major und wird 3 cm in diese Richtung eingeschlagen. Anschließend erfolgt die Bohrung mit Hilfe eines 2-mm-Bohrers durch das Iliosakralgelenk. Dieses zeichnet sich durch einen erhöhten Widerstand aus, der abfällt, sobald das Os ilium erreicht ist. Eine Sonde oder ein ähnliches Messinstrument wird sukzessive eingeführt, bis eine optimale Tiefe von 80 bis 100 mm erreicht wird. Die Maße der Schrauben variieren in der Literatur und Praxis und liegen im Ermessen des Operateurs (Yilmaz et al., 2018). Das Gleiten der Sonde in der Spongiosa zwischen den beiden kortikalen Blättern wird auch als Tunneltechnik bezeichnet. Im Falle eines erhöhten ossären Widerstands, beispielsweise aufgrund von Sklerosierung des Gelenks oder vorangegangenen Fusionen, bietet sich die Verwendung eines Gewindeschneiders an. Dieser sollte 1 mm schmaler als die Schraube sein.

Analog zu dieser Prozedur läuft die Anlage auf der zweiten Seite ab. Anschließend erfolgt die Kontrolle der korrekten Platzierung der Sonde mittels einer lateralen Röntgenaufnahme. Die Sonden sollten sich hierbei kranial des Foramen ischiadicum projizieren lassen. Die Inline-Platzierung der Schrauben erleichtert die Montage und reduziert die Belastungen beim Verriegeln der Stangen (Koller,

Zenner, Hempfing, Ferraris, & Meier, 2013). Sollte eine umfangreichere Verankerung notwendig sein, gibt es die Möglichkeit jeweils zwei S2AI-Schrauben pro Seite zu implantieren.

Bei allen Patienten erfolgt dann die Implantation des Stabes: Dazu werden die Stäbe in leichter Lordose konturiert und etwa 1 cm länger geschnitten, als dies zur Ablenkung des Bandscheibenraums an sich erforderlich wäre. Die Stange und die Verriegelungsstopfen werden in die mehrachsigen Schraubenköpfe eingeführt und festgezogen. Diese Längsträger sollten spannungsfrei eingelegt werden können.

Anschließend wird eine axiale Kompression entlang der Stäbe über den Schrauben ausgeübt, die die Cages verriegelt und die segmentale Lordose erleichtert. Die kontralateralen Facetten- und bilateralen Querfortsätze werden dekortiziert und mit Knochentransplantat gepackt. Abschließend erfolgen die Spülung und Blutstillung und Einlage einer Drainage mit geschlossener Absaugung. Die Wunde wird in Schichten geschlossen, um den Eingriff abzuschließen (Fleege, Rickert, & Rauschmann, 2015; Hoffmann & Kandziora, 2020; Koller et al., 2013; Madert, Liem, Frosch, & Niemeyer, 2013; Schnake et al., 2019; *T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem*, 2012).

5.2.3 Eigenschaften der Cages

Um eine bessere ventrale Abstützung und höhere Fusionsrate zu erreichen, werden intervertebrale Platzhalter anstelle der Bandscheiben eingesetzt. Als solche Platzhalter setzt man heute in der Regel industriell gefertigte Implantate, sogenannte Cages aus verschiedensten Komponenten, ein. Am häufigsten werden Cages aus Titan und aus PEEK (Polyetheretherketon) verwendet. Auf Grund der überlegenen ossären Integration wurden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Titan-Cages verwendet. Die Auswahl des Cages muss stets vom Operierenden getroffen werden. Die Cages werden vor dem Einbringen mit Spongiosa- oder Knochenersatzstoffen gefüllt. Die Fusionsraten der gängigen Cagematerialien Titan und PEEK liegen zwischen 80 und 100 % (Schnake et al., 2019).

Die untersuchten Teilnehmenden erhielten ausschließlich die Cages der Firma Depuy Synthes. Es wurden entweder das transforaminale posteriore atraumatische lumale Cagesystem (T-PAL s. Abb 11) oder das devex system verwendet.

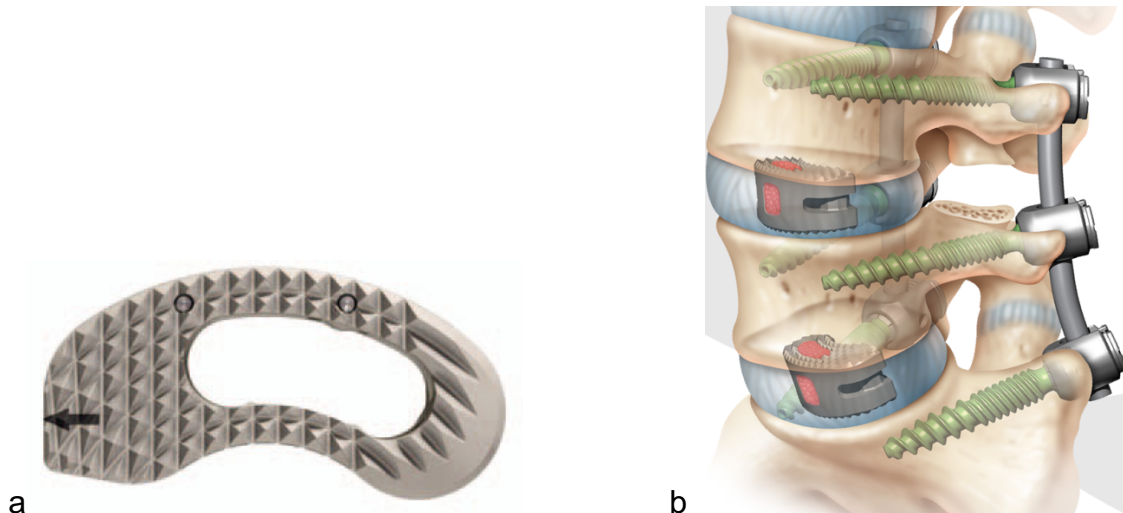


Abbildung 11a: T-PAL Implantat der Firma Synthes aus PEEK und 11b: Beispiel des Ergebnisses der Implantation eines lumbales Cagesystems (T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem, 2012)

5.2.4 Postoperative Nachsorge

Die postoperative Nachsorge erfolgt nach Klinikstandard bei allen Patient:innen in gleicher Weise: Kompressen-Pflaster-Verband, Überwachung im Aufwachraum mit Monitoring der neurologischen Funktion, insbesondere im Hinblick auf Paresen oder Sensibilitätsstörungen.

Am ersten postoperativen Tag erfolgt die frühzeitige achsengerechte Mobilisation unter physiotherapeutischer Anleitung und eine gewichtsadaptierte Thromboseprophylaxe mit einem niedermolekularem Heparinanalogen wurde begonnen. Am zweiten postoperativen Tag werden ein Verbandswechsel, ggf. die Drainagenentfernung je nach Fördermenge, und eine Röntgenkontrolle in 2 Ebenen durchgeführt.

Die Nachbehandlung beinhaltet zunächst zweitägige Verbandswechsel. Die Entlassung erfolgt in der Regel am zehnten postoperativen Tag, die Entfernung des Hautverschlussmaterials am vierzehnten postoperativen Tag. Zu beachten ist die Einleitung von Rehabilitationsmaßnahmen zum späteren Belastungsaufbau und die Empfehlung, Heben und Tragen von Lasten über 5 kg und zunächst sportliche Betätigung zu vermeiden. Die Nachuntersuchung erfolgt 6 bis 12 Wochen

nach dem Eingriff mit klinischer und radiologischer Evaluation. Eine Abschlussuntersuchung ist 1 Jahr post operationem empfohlen, erneut mit klinischer und radiologischer Untersuchung (Hoffmann & Kandziora, 2020).

5.3 Nachuntersuchung

Anamnestisch befragte man die Studienteilnehmer nach ihrer aktuellen Schmerzsymptomatik, nach weiterhin vorhandenen oder neu aufgetretenen Sensibilitätsstörungen sowie motorischen Defiziten. Ergänzend prüfte die Untersucherin die Motorik und Sensibilität an den unteren Extremitäten. Blasen- und Mastdarmstörungen wurden ebenfalls erfragt, da diese wie bereits in der Einleitung erläutert zu den sogenannten red flags für schwerwiegendere Schädigungen der Wirbelsäule gehören.

Die körperliche Untersuchung bildete ergänzend zur Anamnese die Schlüssel-funktion für das Erfassen der Beschwerden der Proband:innen, als Voraussetzung für eine gezielte Diagnostik und Therapie. Diese Studie konzentrierte sich auf die Überprüfung der wirbelsäulenspezifischen Charakteristika, v.a. die des unteren Rückens zu Erfassung des funktionellen Ergebnisses. Dabei orientiert sie sich an der nationalen Versorgungsleitlinie zum nicht-spezifischen Kreuzschmerz des ärztlichen Zentrums für Qualität in der Medizin von 2017 (Bundesärztekammer (BÄK) (2017).

Zunächst erfolgte die orientierende Untersuchung auf Klopfschmerzhaftigkeit durch Abklopfen der Wirbelsäule von kranial nach kaudal. Beurteilungskriterium dabei war die Schmerzangabe der Studienteilnehmenden. Anschließend folgte die Palpation der Processus spinosi der gesamten Wirbelsäule und der Iliosakralgelenke, um Druckschmerzen festzustellen.

Der aktive Bewegungsumfang der Lendenwirbelsäule wurde nach der seit Jahrzehnten etablierten Neutral-Null-Methode erfasst, die Messung erfolgte mit Hilfe eines Goniometers (Simmel, Settner, Schmidt, & Ernst, 2017). Der Fokus dieser Untersuchung lag dabei auf den Fähigkeiten der Lateralflexion und der Rotation der Lendenwirbelsäule, da diese durch eine erfolgreiche Versteifung typischerweise eingeschränkt sind (Kortmann, Wolter, Reckert, & Jürgens, 1987).

Bei der Untersuchung der Lateralflexion standen die Proband:innen gerade und stabil hüftbreit, die Gewichtsverteilung auf beiden Beinen ausgeglichen und mit gestreckten Knien. Die Untersucherin kontrollierte, dass das Becken der Studienteilnehmenden nicht seitlich kippte oder zur Gegenseite auswich und der Schultergürtel nicht rotierte. Zur Messung der Rotationsfähigkeit der Wirbelsäule saßen die Proband:innen mit locker verschränkten Armen, während die Untersucherin eine Rumpfrotation ausführte.

Die Bestimmung des Fingerbodenabstands (FBA) zeigte bei Proband:innen mit chronischen Rückenschmerzen eine gute Korrelation zur subjektiven schmerzbedingten Beeinträchtigung (T. Walter, 2013). Dazu versuchen die Teilnehmenden mit gestreckten Knien mit den Händen den Boden zu berühren. Gemessen wird der Abstand zwischen Fingerspitzen und Boden in Zentimetern, bei jungen beweglichen Menschen beträgt dieser in der Regel Null bis Zehn Zentimeter.

Das **Schober-Zeichen** ist ein Maß für die Flexionsfähigkeit der LWS aus dem Stand. Mit dem Maßband wird eine zehn Zentimeter lange Strecke vom ersten sakralen Wirbelkörper nach kranial abgemessen. Anschließend beugen sich die Proband:innen mit dem Rumpf nach vorne. Die Vergrößerung des Abstands der beiden Messpunkte wird gemessen, normal ist eine Vergrößerung des Abstands um vier bis sechs Zentimeter. Werte unterhalb des Referenzbereichs weisen auf eine eingeschränkte Beweglichkeit hin, Werte darüber sprechen für eine Hypermobilität in diesem Bereich.

Äquivalent dazu untersucht das **Ott-Zeichen** die Brustwirbelsäule (BWS). Hierzu wird eine 30 Zentimeter lange Strecke vom Processus spinosus des 7. Halswirbelkörpers nach kaudal abgemessen. Beim Vorneigen vergrößert sich der Abstand um zwei bis vier Zentimeter.

Eine eingeschränkte Beweglichkeit kann durch degenerative, posttraumatische oder entzündliche Pathologien der Wirbelsäule, ebenso wie durch die Fusionsoperationen bei den untersuchten Studienteilnehmenden eingeschränkt sein.

Der **Feder-, Federungs- oder auch Springing Test** der lumbalen Wirbelkörper dient der Beurteilung der Stabilität und Feststellung möglicher Funktionsstörungen der Wirbelkörper und wurde ausschließlich in den operierten Wirbelkörpern durchgeführt. Die Untersucherin palpierter mit ihren Fingerkuppen die Wirbelkörper der liegenden Testpersonen, woraufhin die andere Hand einen ulnarseitigen ruckartigen Druck ausübte, der einen federnden Charakter aufwies. Eine intakte Gelenkfunktion ist als weiches Federn spürbar, bei negativem Test tritt weder ein Schmerz noch ein Gleiten des Wirbelkörpers auf. Bei einer segmentalen Blockierung bleibt das Federn aus oder ist eingeschränkt (Buckup, Hoffmann, & Goetz, 2019).

Ebenfalls wurde das 2017 veröffentlichte diagnostische Bewertungssystem für Schmerzen des Iliosakralgelenks (**Scoring System for Sacroiliac Joint Pain**) verwendet, das zur Unterscheidung von Schmerzen wegen eines lumbalen Bandscheibenvorfalles oder lumbaler Spinalkanalstenose entwickelt wurde. Bei mehr als 4 Punkten besteht eine Sensitivität von über 90 %, sowie eine Spezifität von mehr als 86 % und es ergibt sich ein positiver Test (D. Kurosawa et al. (2017)). Je mehr Beschwerden der Untersuchte erlebt, die auf das Iliosakralgelenk als Schmerzzursprung hinweisen, desto höher ist der Score.

Die Kriterien sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5: Bewertungssystem für Schmerzen des Iliosakralgelenks (Scoring System for Sacroiliac Joint Pain) (D. Kurosawa et al., 2017)

	Objekt	Wertung in Punkten
1.	Ein-Finger-Test	3
2.	Leistenschmerzen	2
3.	Schmerzen beim Sitzen auf einem Stuhl	1
4.	Schertest des Iliosakralgelenks	1
5.	Schmerzen der Spina iliaca posterior superior	1
6.	Schmerzen des Ligamentum sacrotuberale	1
	Maximale Gesamtpunktzahl	9

Die Objekte 1 bis 3 des Scores wurden während des Anamnesegesprächs ermittelt. Zur Durchführung des Ein-Finger-Tests wurden die Proband:innen gebeten, mit dem Zeigefinger auf den Hauptort des Schmerzes zu deuten. Der Test wurde als positiv im Sinne vorhandener Beschwerden gewertet, wenn der Finger auf die Spina iliaca posterior superior wies oder innerhalb eines Radius von zwei Zentimeter um diese herum zum Liegen kam. Zu sehen ist dies in folgender Abbildung:



Abbildung 12: Auswertung des Ein-Finger-Tests



Abbildung 13: Durchführung des Schertests des Iliosakralgelenks

(D. Kurosawa et al., 2017)

Der sogenannte Schertest wurde in Bauchlage durchgeführt. Die Untersucherin platzierte ihre Handfläche auf der Crista iliaca und erzeugt durch Druck nach kaudal, mit Hilfe der zweiten Hand eine Scherkraft auf das Iliosakralgelenk, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Im Falle eines positiven Tests geben die Studienteilnehmenden Schmerzen an.

Die nachfolgenden aufgeführten Schmerzpunkte wurden im Rahmen einer japanischen Studie von 2012 (D Kurosawa & Murakami, 2012) aufgrund ihrer hohen Spezifität für das Bewertungssystem ausgewählt:

Tabelle 6: Schmerzpunkte des Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain

Schmerzpunkt	Auffindbarkeit
Spina iliaca posterior superior	Knochenvorsprung am hinteren Ende der Crista iliaca
Ligamentum sacroiliacum posterius	Kaudal der Spina iliaca posterior superior
Ligamentum sacrotuberale	Kranial des Tuber ischiadicum bei entspanntem Musculus gluteus maximus in Bauchlage
Musculus iliacus	An der Innenseite der Spina iliaca anterior superior

In Anbetracht der positiven Rate in den Vergleichsgruppen und der Odds Ratio wurden von Kurosawa et al. die Druckpunkte der Spina iliaca posterior superior und das Ligamentum sacrotuberale für das Bewertungssystem ausgewählt (D. Kurosawa et al., 2017).

Bestandteil der Leitlinien bei unteren Rückenschmerzen ist zusätzlich eine orientierende neurologische Untersuchung, die sich in dieser Studie auf die unteren Extremitäten beschränkte. Die Datenerhebung erfolgte immer im Seitenvergleich. Bestandteil ist die Testung der groben Kraft (Kraftgrade 1–5 nach Janda, s. Abb. 7) der entsprechenden segmentalen Kennmuskeln zum Nachweis möglicher Paresen. Berücksichtigt werden dabei die Hüftflexion (L1-4), Hüftextension (L1-2), Knieflexion (L5-S2), Knieextension (L4), Dorsalextension des Fußes (L4-5), Plantarflexion des Fußes (S1) und die Dorsalextension der Großzehe (L5).

Tabelle 7: Beurteilung der Muskelkraft nach Medical Research Council (Paternostro-Sluga et al., 2008)

Kraftgrad	Befund
0	Keine Muskelaktivität
1	Tastbare Muskelaktivität ohne Bewegungseffekt
2	Bewegung ohne Einfluss der Schwerkraft bzw. nur unter Ausschaltung der Schwerkraft möglich
3	Bewegung gegen die Schwerkraft möglich
4	4- Bewegung gegen leichten Widerstand möglich
	4 Bewegung gegen mäßigen Widerstand möglich
	4+ Bewegung gegen kräftigen Widerstand möglich, aber schwächer als auf der Gegenseite
5	Normalbefund: Seitengleiche Kraftentfaltung gegen kräftigen Widerstand

Des Weiteren wurde die Sensibilität der unteren Extremität überprüft durch Bestreichen der Haut der gesamten unteren Extremität im Seitenvergleich. Dabei wurde auf eine (dermatombezogene) Ausfallsymptomatik geachtet.

Das **Lasègue-Zeichen** bezeichnet einen Nervendehnungstest in Rückenlage. Das gestreckte Bein wurde hierzu passiv im Hüftgelenk um bis zu 70° gebeugt. Bei scharfen Schmerzen im Bein bis zu einem Winkel von etwa 45°, vom Rücken in das Bein einschließend und bis unter das Knie ausstrahlend, ist der Test positiv. Als Schmerzursache wird hierbei die Dehnung des Nervus ischiadicus gesehen durch eine Nervenwurzelkompression im Bereich L5 und S1.

Ergänzend wurde bei einem positiven Lasègue-Test der **Bragard-Test** durchgeführt: passive Absenkung des Beins bis zur Wiedererreichung der Schmerzfreiheit mit Extendierung des Sprunggelenks passiv nach dorsal. Bei positivem Bragard-Zeichen trat dann der typische Dehnungsschmerz des Nervus ischiadicus erneut auf (Janka, Merkel, & Schuh, 2019). Liegt bei Dehnungsschmerz der rückseitigen Oberschenkelmuskulatur dagegen lediglich ein Pseudo-Lasègue vor, der beispielsweise durch degenerative Veränderungen oder eine verkürzte ischiocrurale Muskulatur verursacht wird, so ist der Bragard-Test negativ (Konrads & Raab, 2018).

Die weitere Untersuchung des sakroiliakalen Gelenks erfolgte durch lokale Schmerzpalpation und Schmerzprovokation durch Kompression des Gelenkes.

5.4 Fragebogenauswertung

Im Rahmen der Studie wurden etablierte und validierte Fragebögen eingesetzt, die 2018 als Kerninstrumente zur Messung des Ergebnisses von klinischen Studien bei unspezifischen Schmerzen im unteren Rückenbereich bestätigt wurden (Chiarotto et al. (2018)). Fokus lag in der vorliegenden Studie auf physischer Funktionsfähigkeit und Schmerzintensität zur Beurteilung der Unterschiede des postoperativen Outcomes der beiden Studiengruppen.

Tabelle 8: Übersicht der ausgewerteten berichteten Zielgrößen

Berichtete Zielgröße	Eigenschaften		
	Anzahl an Posten	Antwortmöglichkeiten	Punktebereich
ODI	10	0 - 5 Bewertungsskala	0 - 100
RMS	24	0 - 1 ja oder nein	0 - 24
NRS/VAS	1 pro Kategorie	0 - 10	0 - 10 pro Kategorie

5.4.1 Oswestry Disability Index (ODI)

Der ODI ist die am häufigsten empfohlene und verwendete Messmethode bei Wirbelsäulenerkrankungen, wie chronischen lumbalen Rückenschmerzen (Chapman et al., 2011; Fairbank & Pynsent, 2000). Dieser Fragebogen erfasst funktionelle Ergebnisse und eignet sich aus diesem Grunde, insbesondere als Kontrollvariable nach Interventionen, wie Operationen (s. Anhang 1).

Er umfasst er acht Dimensionen, Schmerz, Körperpflege, Heben, Gehen, Sitzen, Stehen, Schlafen, Sexualeben, Sozialleben und Reisen, in zehn Fragen. Jede Frage wird unter Verwendung einer Skala von null bis fünf beantwortet, wobei Fünf eine maximale Beeinträchtigung bedeutet. Die Fragen beziehen sich auf den „jetzigen“ Zeitpunkt, also den der Beantwortung. Die Auswertung erfolgt, indem die angegebenen Punkte addiert und durch den Maximalwert (50 Punkte) geteilt werden. Der errechnete Wert wird mit 100 multipliziert, um ein Ergebnis in Prozentpunkten zu erhalten (Fairbank & Pynsent, 2000). Die prozentualen Ergebnisse erlauben eine Einteilung nach Grad der funktionellen Einschränkung der Betroffenen.

0 bis 20 %	minimale Behinderung
21 bis 40 %	moderate Behinderung
41 bis 60 %	schwere Behinderung
61 bis 80 %	bewegungsunfähige/ lähmende Behinderung
> 80 %	bettlägerig

Studien lassen darauf schließen, dass der ODI im Vergleich zu dem im folgenden Absatz näher erklärten Roland-Morris Score (RMS) besser dazu geeignet sein, kann Veränderungen bei Proband:innen mit schwerer wiegenden

Einschränkungen zu erfassen, während Letzterer möglicherweise Vorteile bei weniger starken Einschränkungen aufweist (Fairbank & Pynsent, 2000).

5.4.2 Roland - Morris Score (RMS)

Der neben dem ODI fast genauso häufig verwendete Rückenschmerz-spezifische Fragebogen zur Erfassung der funktionellen Einschränkung und Behinderung ist der Roland-Morris Disability Questionnaire (RMDQ) oder Roland-Morris-Score (s. Anhang 2). Dieser umfasst 24 Aussagen zu alltäglichen Handlungen, die im Sinne einer Entscheidungsfrage von den Versuchsteilnehmenden beantwortet werden sollen. Für jede bejahte Aussage wird ein Punkt gezählt und zu einem Gesamtwert addiert. Auch dieser Score soll den „heutigen“ Zustand erfassen (Junge & Mannion, 2004).

Die 24 abgefragten Beschwerden wurden aus dem britischen Sickness Impact Profile, welches 136 Posten zur Erfassung von physischer und psychischer Gesundheit enthält, gezielt ausgewählt, da diese am wahrscheinlichsten mit lumbalen Rückenschmerzen assoziiert sind. Je höher der Ergebniswert des Fragebogens, desto größer sind die funktionellen Einschränkungen für die Proband:innen einzuschätzen.

Eine retrospektive Datenanalyse suggeriert, dass im Vergleich eine Ergebnisdifferenz von mindestens 4 angenommen werden sollte, um zwischen den Studienteilnehmenden mit erhaltener/ wiedergewonnener Funktionalität und denen mit einer Störung dieser zu unterscheiden (Stratford & Riddle, 2016).

5.4.3 Visuelle Analog Skala (VAS)

Eine der geläufigsten Messinstrumente für Schmerzintensität sind die Numerische Rating Skala (NRS) und die Visuelle Analog Skala (Chapman et al., 2011). Die Werte der VAS reichen von null, dies entspricht Schmerzfreiheit, bis zehn, dem schlimmsten vorstellbaren Schmerz. Die Proband:innen umkreisen bzw. kreuzen die Zahl an, die am besten die Schmerzdimension, normalerweise die Intensität, beschreibt. Die Einfachheit, Reproduzierbarkeit und Sensitivität bei geringfügigen Änderungen der Schmerzintensität sind Vorteile dieser

Messmethode (Iohom, 2006; Lazaridou, Elbaridi, Edwards, & Berde, 2018). Ergänzt wird dies durch die VAS im Sinne von Bildsymbolen, die die passenden Gesichtsausdrücke darstellen (s. Anhang 3).

In dieser Studie wurden verschiedene Zeitpunkte bzw. Situationen erfasst; Ruheschmerzen, Schmerzen bei körperlicher Belastung und während der Nacht.

5.5 Radiologische Verfahren

5.5.1 Radiologische Untersuchungstechnik

Die konventionellen Röntgenaufnahmen der Lendenwirbelsäule wurden in der Regel von allen Proband:innen prä- und postoperativ, mit dem Ziel der Planung des Eingriffes, sowie der Überprüfung der erfolgreichen Instrumentierung, routinemäßig aufgenommen. Sie stellen eine bedeutende diagnostische Grundlage zur Beurteilung des Wirbelsäulenprofils dar. Im Rahmen dieser Studie fand lediglich die Beachtung der postoperativen Aufnahmen statt. Etabliert ist hierbei eine Aufnahme in zwei Ebenen. Dies umfasst zum einen die p.a.-Projektion, also ein Röntgenbild, bei welchem der Strahlengang von hinten nach vorne erfolgt. Zum anderen wird eine laterale Aufnahme, also in seitlicher Position, durchgeführt. Die Umsetzung sollte möglichst stehend erfolgen. Wenn es den Proband:innen nicht möglich war, ohne fremde Unterstützung zu stehen, fanden die Untersuchungen im Liegen statt. Die Vermessung erfolgte an den digitalen Bildern des Programmes PACS (Picture Archiving and Communication System) des Universitätsklinikums Tübingen.

5.5.2 Spinopelvine Parameter und lumbale Lordose

Die spinopelvinen Größen beschreiben die Rotation, Kippung und Konfiguration des Beckens in der Sagittalebene und können neben der chirurgischen Planung ebenso zur Indikationsstellung einer operativen Korrektur bei Schmerzen aufgrund von Fehlstellungen und Dysbalancen hinzugezogen werden. In dieser Studie sollen Unterschiede der beiden Vergleichsgruppen bezüglich dieser Parameter und insbesondere im Hinblick auf Schmerzen des Iliosakralgelenks festgestellt und gedeutet werden. Die Resultate von Kalidindi et al. dokumentieren eine signifikant geringere prä- und postoperative Lendenlordose, sowie eine signifikant höhere postoperative Beckenkippung bei Patient:innen mit neu

aufgetretenen Schmerzen des Iliosakralgelenks im Vergleich zu Patient:innen ohne postoperative ISG-Schmerzen (Kalidindi et al., 2021).

Im Jahr 1998 führten Legaye et al. das Konzept der Pelvic Incidence (PI) ein, welches als grundlegender Beckenparameter zur dreidimensionalen Regulation der sagittalen Wirbelsäulenkrümmung dient. Ihre Forschung ergab, dass der PI-Winkel durch die Summe der Sakrumneigung (SS) und der Beckenkipfung (PT) definiert ist. Der PI-Winkel stellt einen individuellen und situationsspezifischen Wert dar und zeigt eine enge Beziehung zur SS auf, die wiederum die Lendenlordose (LL) maßgeblich beeinflusst (Legaye, Duval-Beaupère, Hecquet, & Marty, 1998).

Tonosu et al. stellten in ihrer prospektiven Untersuchung von 265 Patient:innen eine Inzidenz von Schmerzen des Iliosakralgelenks nach lumbalen Wirbelsäulenoperationen von 3,0 % fest. Höhere prä- und postoperative PI-Werte waren signifikant mit postoperativen Iliosakralgelenkschmerzen assoziiert. Andere spinopelvine Größen, wie LL, PT und SS korrelierten nicht mit Iliosakralgelenkschmerzen (Juichi Tonosu et al., 2019).

Zur Beurteilung der sagittalen Krümmung der Wirbelsäule empfiehlt sich der lumbale Lordosewinkel (LL) mit Hilfe der bewährten Messung nach Cobb. Diese erfolgt zwischen der Deckplatte des ersten lumbalen Wirbelkörpers und der Bodenplatte des fünften lumbalen Wirbelkörpers (s. Abb. 14) (Srinivasalu et al., 2008). Das verwendete PACS erfordert die Eintragung dieser Linien und berechnet den Winkel zwischen dem Schnittpunkt der beiden Geraden. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 14: Zunächst werden die beiden unterbrochenen Linien als Verlängerung der angesprochenen Platten der Wirbelkörper gezogen. Der Cobb-Winkel besteht zwischen diesen beiden (Winkel a) oder zwischen zwei rechtwinklig zu ihnen gezogenen Linien (durchgezogene Linien) (Winkel b). Bei korrekter Messung sind beide identisch.

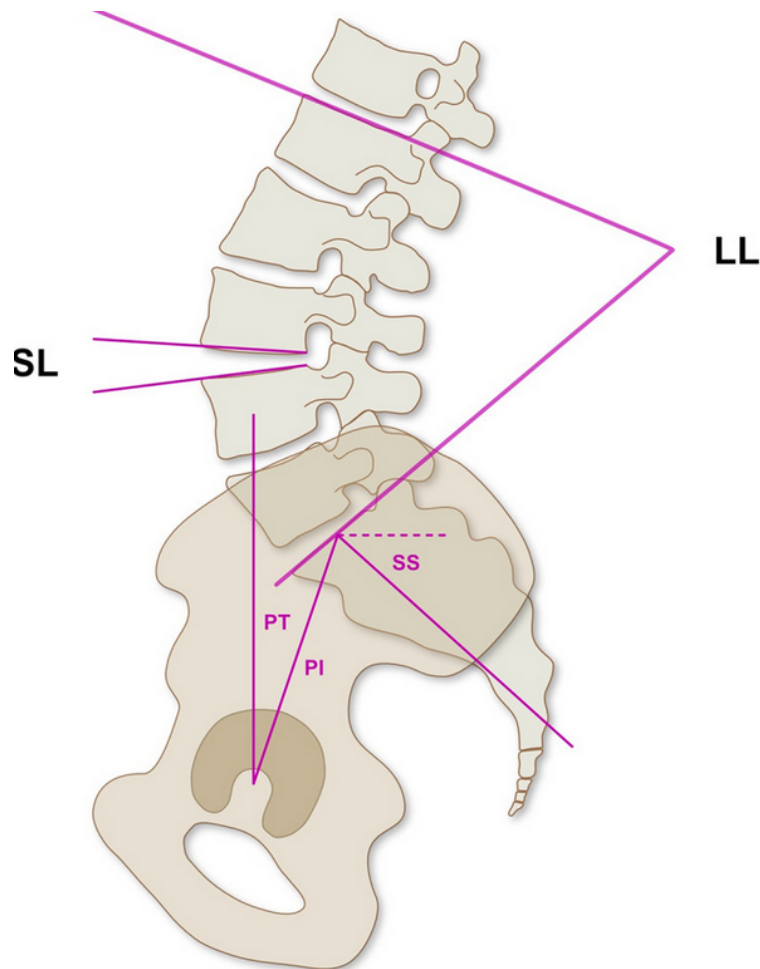


Abbildung 14: Messung der radiologischen lumbalen Parameter (C. Walter et al., 2021)

Das Ausmaß der Bewegung des Iliosakralgelenks bei Erwachsenen wird als 1° bis 4° Rotation, das bedeutet einem Ausmaß von 1 bis 2 mm, angegeben. Die Bewegung des Iliosakralgelenks kann anhand der **Pelvic Incidence (PI)** bewertet werden. Die PI ist sehr individuell und legt sich im Laufe der Pubertät fest, der Mittelwert beträgt $55^\circ \pm 10^\circ$, der Referenzbereich liegt bei 35 - 85° (Cheung, 2020). Gemessen wird der Winkel zwischen dem Mittelpunkt des Femurkopfes und der Linie, die orthograd zum Zentrum der Endplatte des ersten sakralen Wirbelkörpers. (s. Abbildung A in Abb. 15)

Während der Nutationsbewegung steigt die PI an, bei Gegenrotation ist diese verringert, sie beschreibt demnach die Position des Sakrums im Becken. Da die Bewegung klein ist, wird die PI allgemein als Schlüsselvariable für die Schätzung der idealen Lordose der Lendenwirbelsäule angesehen, die in der Wirbelsäulenchirurgie wiederhergestellt werden soll.

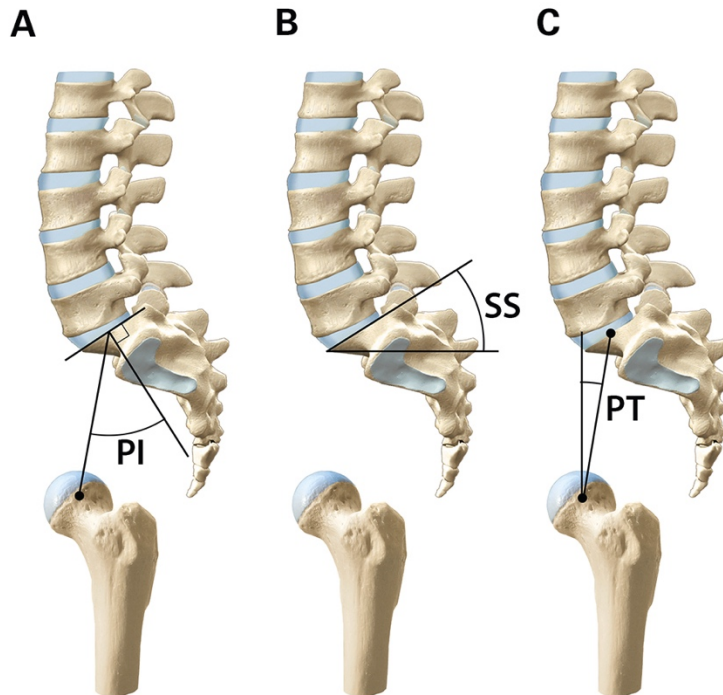


Abbildung 15: Spinopelvine Parameter (Ulrich et al., 2021), PI = pelvic incidence, SS = sacral slope, PT = pelvic tilt

Zusätzlich erfasst wurde die Sakralneigung, die die Kippung der Endplatte des ersten Sakralwirbelkörpers zur Horizontalen angibt und als **Sacral Slope (SS)** bezeichnet wird (s. Abbildung B in Abb. 15). Dieser Wert beträgt im Idealfall $41^\circ \pm 8,4^\circ$ (Vialle et al., 2005).

In welchem Neigungswinkel sich das Becken zum Femurkopf befindet, zeigt der **Pelvic Tilt (PT)** an, der Durchschnittswert liegt bei $13^\circ \pm 6^\circ$. Bei Retroversion oder Rückwärtsrotation steigt der PT an, bei der Anteversion oder Vorwärtsrotation des Beckens nimmt er ab. Er entspricht dem Winkel zwischen einer Verbindungslinie vom Zentrum des Femurkopfes und Mittelpunkt der Endplatte des ersten Sarkalwirbelkörpers auf der einen Seite, sowie einer vertikalen Linie durch das Hüftgelenkchsenzentrum auf der anderen (s. Abbildung C in Abb. 15).

Rechnerisch ergibt sich folgende Beziehung zwischen den Parametern:

$$\mathbf{PI = PT + SS}$$

Folglich kommt es beispielsweise bei einer pelvinen Retroversion zu einem erhöhten PT und verkleinertem SS.

Die Ausrichtungsziele der Operationen unterscheiden sich auch für niedrige und hohe PI. Die Wiederherstellung der Lordose proportional zum PI-Wert ist unerlässlich. Patient:innen mit hohem PI erfordern eine stärkere Lumbalkorrektur und sind daher während der Operation technisch anspruchsvoller. Der PI ist ein fester anatomischer Parameter, der sich jedoch in Änderungen von PT und SS widerspiegelt. Die Operierenden können nur die entsprechende LL wiederherstellen, um die Werte von PT und SS zu beeinflussen, mit dem Ziel Harmonie zwischen Wirbelsäule und Becken zu erreichen (Cheung, 2020).

Das sagittale Gleichgewicht der Wirbelsäule ist ein umfangreiches Thema, dessen Analyse die Steuerung der chirurgischen Strategie in der Wirbelsäulenchirurgie ergänzt und unterstützt. Es ist sehr nützlich bei der präoperativen Planung, ermöglicht aber auch, zusätzliches Verständnis über die Biomechanik zu gewinnen, falls postoperative Probleme auftreten. Das sagittale Gleichgewicht sollte vor jeder Operation geprüft werden, insbesondere auf der Lendenwirbelsäule und vor allem, wenn die Ebenen von L4 bis S1 in die Fusion einbezogen werden, da diese 66 % der Lordose ausmachen (J. C. Le Huec, Thompson, Mohnsinaly, Barrey, & Faundez, 2019).

5.6 Statistische Methoden

Die weitere Datenanalyse der mittels *Microsoft Office Excel* gespeicherten Daten geschah mit IBM SPSS-Statistics (Version 28.0.1.1).

Zur statistischen Aufarbeitung wurden die Werte zunächst durch Auswertung der Histogramme und mithilfe des Shapiro Wilk Tests auf Normalverteilung untersucht. Hier zeigten sich weitestgehend Werte größer als 0.05, siehe Tabelle 9 unter Ergebnisse, sodass eine Normalverteilung angenommen und mit parametrischen Tests (t-test) gerechnet wurde. Das Signifikanzniveau entsprach einem Wert von $p < 0.05$.

Bei den ordinal skalierten Werten wurden der arithmetische Mittelwert (MW), die Standardabweichung (SD), sowie die Minima und Maxima angegeben.

Sowohl demografische Charakteristika als auch Ergebnisse der klinischen Untersuchung wurden rein deskriptiv in der Analyse berücksichtigt. Aufgrund von Rundungen ergibt die Summe der Einzelwerte nicht immer genau 100 %.

Die Rundung der Daten auf eine Dezimalstelle wurde gewählt, um die Ergebnisse in einer klaren und prägnanten Weise darzustellen, während gleichzeitig die Genauigkeit angemessen berücksichtigt wird. Die Entscheidung für eine Dezimalstelle basiert auf der Natur der Messungen und der Tatsache, dass eine größere Anzahl von Dezimalstellen in diesem Kontext keine zusätzliche präzise Information liefern und zudem die Lesbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen könnte. Die präsentierten Ergebnisse sind dennoch ausreichend genau, um die Schlussfolgerungen der Studie zu unterstützen und die Diskussion der Ergebnisse zu ermöglichen.

Bereits bei der Datenerhebung wurden fehlende Werte identifiziert, weil bestimmte Daten für bestimmte Patient:innen nicht erhoben werden konnten. Obwohl alle Bemühungen unternommen wurden, um alle Daten vollständig zu erfassen, können in einer Studie mit menschlichen Teilnehmenden gelegentlich Fälle auftreten, in denen bestimmte Messungen nicht verfügbar sind. Dies war zumeist schmerzbedingten Bewegungseinschränkungen geschuldet. Der Umgang mit diesen fehlenden Daten erfolgte unter der Annahme, dass sie im Sinne eines "Missing at random" (MAR) vorlagen. Um mit diesen fehlenden Daten umzugehen, wurde eine "Complete Case Analysis" durchgeführt, bei der nur die Patient:innen berücksichtigt und in der finalen Analyse einbezogen wurden, für die vollständige Daten vorlagen. Es ist wichtig zu beachten, dass der Ausschluss der Fälle mit fehlenden Daten zu einer Verringerung der Stichprobengröße führt und die Repräsentativität der Stichprobe beeinflussen kann. Die Entscheidung, diese Vorgehensweise anzuwenden, wurde aufgrund einer gründlichen Überlegung der verfügbaren Daten und des spezifischen Untersuchungskontexts getroffen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine statistische Auswertung basierend auf den verfügbaren vollständigen Daten.

6 Ergebnisse

6.1 Resultate der gesamten Studienpopulation

6.1.1 Deskriptive Erhebungen

Insgesamt wurden 30 Proband:innen im Rahmen dieser Studie untersucht, davon erhielten 14 keine Iliumschrauben (Gruppe 1) und 16 S2AI-Schrauben

(Gruppe 2). Das Alter zum Zeitpunkt des besagten chirurgischen Eingriffs liegt zwischen 17 bis 82 Jahren, bei einem Durchschnittsalter von 59,7 Jahren (SD \pm 17,3). Es handelt sich um 10 männliche (33,3 %) und 20 weibliche (66,7 %) Teilnehmende.

Zusätzlich zur untersuchten Spondylodese unterzogen sich die Proband:innen im arithmetischen Mittel weiteren 1,7 Operationen (SD \pm 1,4) an der Wirbelsäule, maximal waren es 5 Eingriffe. In der Studienpopulation war bei 10 (33,3 %) der Teilnehmenden eine psychiatrische Diagnose festgestellt worden. Die Einnahme von relevanten Medikamenten zum Untersuchungszeitpunkt erfolgte bei 19 Proband:innen (63,3 %), bei 3 (10 %) konnte diese Angabe nicht eruiert werden.

Die Anzahl der fusionierten Segmente beträgt entsprechend den Auswahlkriterien mindestens 3 und maximal 11 Segmente. Bezogen auf die gesamte Studienpopulation ergibt sich ein Mittelwert von 5,4 Segmenten (SD \pm 2,7). Das durchschnittliche Nachuntersuchungsintervall misst in der gesamten Studienpopulation 21,3 Monate (SD \pm 16,1). Die früheste Überprüfung erfolgte dabei nach 3, die späteste nach 66 Monaten. Der Shapiro-Wilk-Test zur Untersuchung der Normalverteilung ergab die in Tabelle 9 aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 9: Tests auf Normalverteilung, S2AI-Schrauben = S2AI-Schrauben, df = degree of freedom/ Freiheitsgrad, ODI = Oswestry Disability Index, VAS = Visuelle Analog Skala, RMS = Roland Morris Score

Parameter	S2AI-Verschraubung	Shapiro-Wilk-Test		
		Statis-tik	df	Signifikanz
ODI	ohne S2AI-Schrauben	.933	14	,337
	mit S2AI-Schrauben	.956	16	,596
VAS Belastung	ohne S2AI-Schrauben	.952	14	,586
	mit S2AI-Schrauben	.896	16	,070
VAS Ruhe	ohne S2AI-Schrauben	.867	14	,038
	mit S2AI-Schrauben	.929	16	,238
VAS Nachts	ohne S2AI-Schrauben	.857	14	,028
	mit S2AI-Schrauben	.897	16	,072
RMS	ohne S2AI-Schrauben	.935	14	,355
	mit S2AI-Schrauben	.925	16	,204
Scoring System for Sacroiliac Joint Pain	ohne S2AI-Schrauben	.942	14	,441
	mit S2AI-Schrauben	.879	16	,038

Der folgenden Tabelle 10 können die fehlenden Werte und Ursachen dieser entnommen werden.

Tabelle 10: Fehlende Werte

Untersuchung	Ohne S2AI-Schrauben	S2AI-Schrauben	Grund für fehlende Daten
Relevante Medikation	2	1	Nicht eruierbar (Proband nicht erreichbar, Arztbriefe unvollständig)
Schober und Ott Zeichen, FBA		1	Nicht durchführbar wegen schmerzbedingter Beweglichkeitseinschränkung
Federtest		4	Schmerzbedingt nicht durchführbar
Laségue und Bragard-Zeichen		1	Schmerzbedingt nicht untersuchbar
Schertest		3	Schmerzbedingt nicht durchführbar
Schmerzen des Lig. sacrotuberale		2	Schmerzbedingt nicht untersuchbar
Liege-Kinn-Abstand		5	Schmerzbedingt nicht durchführbar

6.1.3 Klinische Untersuchungsergebnisse der Kohorte

6.1.3.1 Fragebogendiagnostik und Scoring System for Sacroiliac Joint Pain

Alle Studienteilnehmenden nahmen am Tag der Nachuntersuchung an der Fragebogenevaluation teil. Der Oswestry Disability Index (**ODI**) beträgt im Mittel 41,1 Punkte (SD \pm 21,9) bei minimalen 2 Punkten, sowie einem maximalen Wert von 82 Punkten.

Die Evaluation mit Hilfe des Roland Morris Score (**RMS**) zeigt eine Spannweite zwischen 2 und 23 Punkten bei einem Mittelwert von 11,6 Punkten (SD \pm 6,0). Die Visuelle Analogskala (**VAS**) erfasst drei Unterkategorien. Bei Angaben zu Schmerzen bei Belastung werden die Grenzen des Fragebogens ausgeschöpft, der von 0 bis 10 Punkte reicht. Im arithmetischen Mittel sind es 5,3 Punkte (SD \pm 2,5). In Ruhe erreichen die Schmerzen Werte zwischen 0 und 9, im Durchschnitt sind es 2,8 (SD \pm 2,4). Die Auswertung der VAS für nächtliche Schmerzen ergibt Punkte zwischen 0 und 8, durchschnittlich bemisst sie sich auf 2,7 Punkte (SD \pm 2,5). Bei Belastung gaben die Proband:innen 5,3 Punkte (SD \pm 2,5) an, bei Werten zwischen 0 und 10.

Die Untersuchungsergebnisse nach den Kriterien des **Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain (SJP)** schöpfen die Grenzen der Gesamtpunktzahl zwischen 0 und 9 aus. In der Gesamtpopulation ergibt sich ein Mittelwert von 3,4

Punkten (SD \pm 2,4). Im Datensatz fehlten die Werte für den Schertest von 3 Proband:innen, sowie für Schmerzen des Ligamentum sacrotuberale bei 2 Proband:innen der ersten Gruppe. Dies lag daran, dass schmerzbedingt keine adäquate Lagerung, in Form einer Bauchlage, möglich war.

6.1.3.2 Beweglichkeitsprüfungen

Die Untersuchung der Beweglichkeit wurde mit Hilfe der klinischen Zeichen nach Schober und Ott, sowie des Fingerbodenabstands bewertet. In der gesamten Kohorte erreicht das Schoberzeichen Werte zwischen 0 und 7 cm, bei einem errechneten Mittelwert von 2,5 cm (SD \pm 1,5). Die Messung nach Ott stellt Ergebnisse fest, die 1 cm bis 5 cm ausmachen. Im Durchschnitt werden 2 cm (SD \pm 1,2) gemessen. Der Fingerbodenabstand beläuft sich auf durchschnittlich 28,4 cm (SD \pm 18,1) bei einer Spannweite zwischen 0 und 71 cm.

Die durchschnittlichen Werte der Gesamtpopulation für die Seitneigungsfähigkeit betragen $16,5^\circ$ (\pm 8,32) nach rechts und $16,5^\circ$ (\pm 8,92) nach links. Die Rotationsfähigkeit bemisst sich auf $12,83^\circ$ (\pm 9,44) nach rechts und $12,83^\circ$ (\pm 9,16) nach links. Der Liege-Kinn-Abstand (LKA) beträgt 8,76 cm (\pm 5,72), die Daten von 5 Patient:innen konnten nicht erhoben werden. Der Federtest war bei 26,92 % der Proband:innen positiv. Die Fallzahl wurde reduziert auf $n = 26$, da bei 4 Proband:innen schmerzbedingt keine Untersuchung erfolgen konnte. Druckschmerzen der Processus spinosi der fusionierten Wirbelkörper wurden bei 18 Patient:innen (60 %) festgestellt.

6.1.3.3 Neurologische Evaluation

Zur Untersuchung möglicher Nervenbeeinträchtigungen empfiehlt sich die Untersuchung nach Lasègue und Bragard, also die Frage nach Sensibilitätsstörungen kaudal des Operationsgebiets, die Erfassung der Muskelkraft der unteren Extremitäten, sowie die anamnestische Evaluation von möglichen Blasen-/ Mastdarmstörungen.

Das Lasègue-Zeichen ist bei 14 (48,3 %) der Untersuchten positiv, ein Teilnehmer konnte schmerzbedingt nicht in Rückenlage untersucht werden. Das Bragard-Zeichen zeigt sich bei 11 (37,9 %) Proband:innen positiv. Insgesamt

wurden bei 20 (66,6 %) der Untersuchten Sensibilitätsstörungen festgestellt. Nach der Operation neu aufgetretene Blasen- oder Mastdarmentleerungsstörungen traten bei 5 Patient:innen auf (16,7 %).

In 19 Fällen (63,3 %) wiesen Untersuchte motorische Defizite der unteren Extremitäten auf. 15 Proband:innen (50 %) demonstrierten dabei einen Kraftgrad von weniger als 4.

6.1.4 Korrelation von klinischen und radiologischen Outcomeparametern unabhängig von der ursprünglichen Gruppeneinteilung

6.1.4.1 Pelvic Tilt

Unabhängig vom Operationsverfahren zeigten sich bei Patient:innen mit einem pathologisch verändertem PT im Vergleich zu Patient:innen mit physiologischem PT erhöhte Einschränkungen, die mit Hilfe des ODI erfasst wurden (s. Abb. 16).

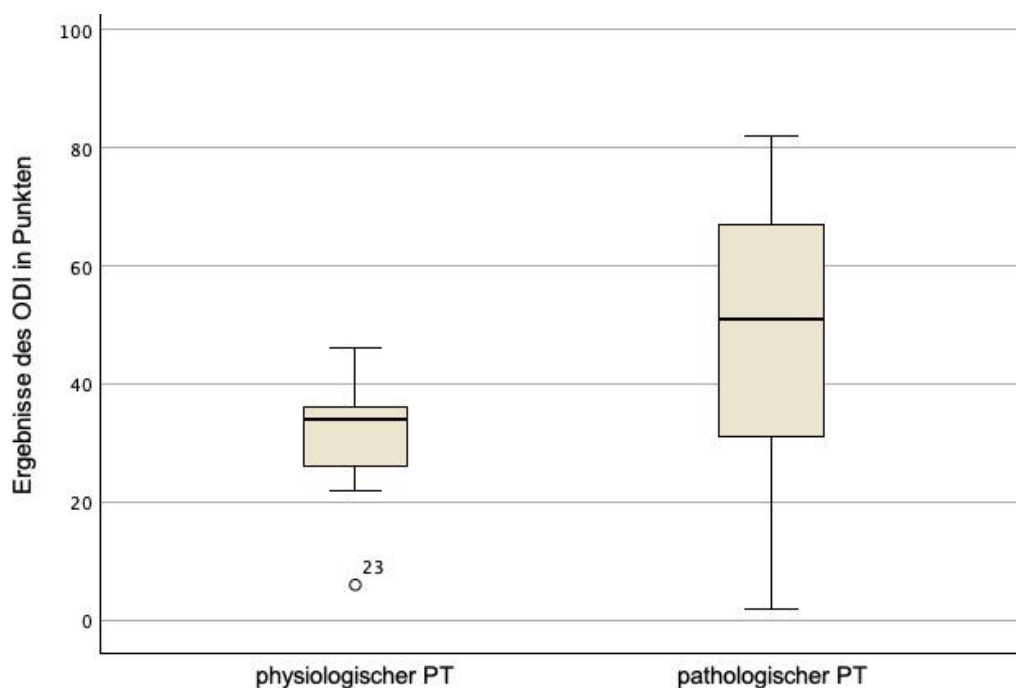


Abbildung 16: Vergleich von Proband:Innen mit physiologischem und pathologischem pelvic tilt (PT) und deren Resultate beim Oswestry Disability Index (ODI)

Der Oswestry Disability Index beträgt bei Untersuchten mit pathologischem Pelvic Tilt im Mittel 46,7 Punkte (SD \pm 23,7), sowie 30,9 Punkte (SD \pm 12,4) bei einem PT im Referenzbereich. Diese Diskrepanz ist allerdings statistisch nicht signifikant.

6.1.4.2 Der Effekt von Voroperationen auf die Funktionalität

Bei der Untersuchung der Hypothese, dass Teilnehmende mit Voroperation ein schlechteres Outcome im Sinne eines erhöhten ODI-Wertes im Vergleich zu Patient:innen ohne Voroperation haben, ergaben sich die folgenden und Abb. 17 entnommenen Ergebnisse.

Durchschnittlich zeigte der ODI bei Proband:innen mit mindestens einer Voroperation 42,9 Punkte (SD \pm 23,6), sowie 35,1 Punkte (SD \pm 14,7) bei Patient:innen ohne Voroperationen, die somit einen deutlich besseren ODI aufweisen. Allerdings fehlt auch hier die statistische Signifikanz.

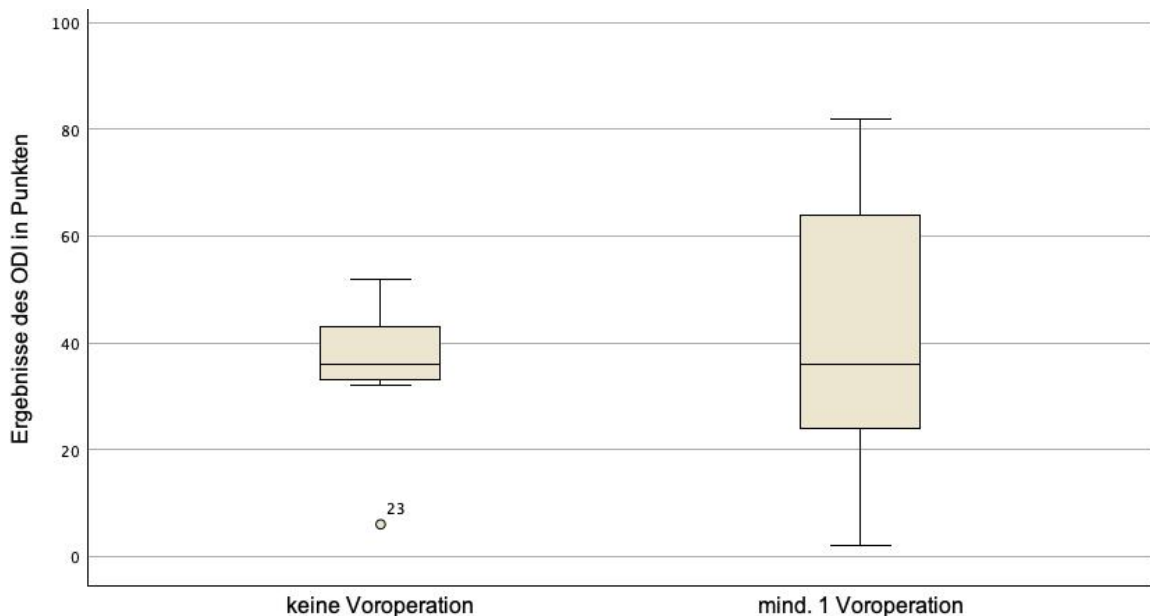


Abbildung 17: Vergleich von Proband:innen mit und ohne Voroperationen und deren Resultate beim Oswestry Disability Index (ODI)

6.1.4.3 Der Zusammenhang von PI und ISG-Schmerzen

Beide Gruppen waren gemäß dem Shapiro-Wilk Test normalverteilt ($p = .602$ für < 4 und $p = .162$ für ≥ 4). Es gab 18 Teilnehmende mit einem Wert von 3 oder weniger Punkten im Scoring System for Sacroiliac Joint Pain und 11 mit einem höheren Wert ($n = 29$). Bei einem Untersuchten konnte die PI nicht festgestellt werden. Die PI war bei Proband:innen mit Iliosakralgelenkschmerzen (≥ 4 Punkte) im Mittel 60,89 Punkte (SD \pm 16,65) und somit höher, als ohne Schmerzen des Iliosakralgelenks (Mittelwert = 50,26 Punkte, SD \pm 15,79). Es gab jedoch keinen

statistisch signifikanten Unterschied zwischen der PI der Proband:innen mit und ohne postoperative Iliosakralgelenkschmerzen ($p = .096$).

6.1.5 Radiologische Ergebnisse aller Teilnehmenden

Die Resultate der radiologischen Befunde umfassen Parameter für die sagittale Balance. Im Rahmen der Genehmigung dieser Arbeit durch die zuständige Ethikkommission wurde festgelegt, dass keine Röntgenaufnahmen, die lediglich dem Zweck der Studie dienen, angefertigt werden. Folglich ergab sich die Notwendigkeit bei einzelnen Proband:innen Röntgenbilder der zuletzt durchgeführten postoperativen radiologischen Kontrolle zur Auswertung zu verwenden. Dies war bei insgesamt 13 Patient:innen der Fall, 4 davon ohne sakropelvine Fixierung und 9 mit S2AI-Schrauben.

Dabei wird der Pelvic Tilt (PT), die Abweichung dessen vom Normwert von $7-19^\circ$ und die Pelvic Incidence (PI) erfasst. Ebenso inkludiert ist die Messung der Sakralneigung (SS) und des lumbalen Lordosewinkels (LL), sowie die Abweichung dessen vom Normwert, der dem $PI \pm 10^\circ$ entspricht.

Der LL reicht von $7,9^\circ$ bis $55,5^\circ$ innerhalb der gesamten Studienpopulation, durchschnittlich beträgt der Winkel $31,6^\circ$ ($SD \pm 14,2$). Die Abweichung vom Normwert beträgt im Mittel $15,8^\circ$ ($SD \pm 14,0$). Der kleinste gemessene PT ist 5° und der größte $47,9^\circ$. Dabei ergibt sich ein Mittelwert von $23,2^\circ$ ($SD \pm 10,4$). Eine Abweichung des PT vom Normwert gibt es nicht in allen Untersuchten, sie erreicht jedoch ein Maximum von $28,9^\circ$ und beträgt im Durchschnitt $7,6^\circ$ ($SD \pm 8,4$). In der Auswertung weist der PI ein Minimum von $26,3^\circ$ und ein Maximum von $101,3^\circ$ auf. Das arithmetische Mittel berechnet sich auf $54,3^\circ$ ($SD \pm 16,7$). Dabei wird eine Abweichung vom Normwert des PI um zwischen 0° und $43,8^\circ$ festgestellt. Durchschnittlich sind es $\pm 15,8^\circ$ ($SD \pm 14,0$). Die Sakralneigung (SS) reicht von $7,9$ cm bis $73,6$ cm und beträgt im Mittel $31,2$ cm ($SD \pm 12,4$). Bei einem Versuchsteilnehmenden konnten die Werte der PT, PI und SS nicht ausgewertet werden, da auf allen verfügbaren Röntgenaufnahmen der zur Messung unentbehrliche Femurkopf nicht dargestellt ist.

6.2 Vergleich von Untersuchten mit und ohne S2AI-Schrauben

6.2.1 Charakteristika der Teilnehmenden

Zunächst soll verglichen werden, inwieweit sich die beiden Gruppen in relevanten Parametern wie Geschlecht, Alter, Anzahl der Voroperationen, Anzahl der operierten Segmente und Nachuntersuchungszeitraum in Monaten unterscheiden. Studienteilnehmende der ersten Gruppe sind durchschnittlich 55,7 Jahre (SD \pm 14,9) alt bei einer Altersverteilung zwischen 17 und 81 Jahren. Dabei sind 8 (57,1 %) von ihnen weiblich und 6 (42,9 %) männlich. Dahingegen sind jene der zweiten Gruppe zwischen 22 und 82 Jahren alt, der Durchschnitt beträgt 63,2 Jahre (SD \pm 18,9). Von den Proband:innen sind 4 (25 %) männlich und 12 (75 %) weiblich.

Der Mittelwert der Anzahl an operierten Segmenten 3,6 Segmenten (SD \pm 1,9) in der ersten Gruppe und 6,9 Segmenten (SD \pm 2,3) in der zweiten Gruppe. Es präsentiert sich eine Spannweite von bis zu 10 (Gruppe 1) bzw. 11 (Gruppe 2) Segmenten.

Bei Studienteilnehmenden ohne S2AI-Schrauben (Gruppe 1) fanden durchschnittlich zusätzliche 1,4 Operationen (SD \pm 1,2) statt, bei denen mit S2AI-Schrauben (Gruppe 2) hingegen 2 (SD \pm 1,6). Das Minimum beträgt bei beiden 0, das Maximum 4 in erstgenannter Kohorte und 5 in der zweiten Gruppe. Eine psychiatrische Erkrankung weist 28,6 % (4) der Zugehörigen zur ersten Gruppe auf, sowie 37,5 % (6) der zweiten Gruppe. Die erste Gruppe umfasst 8 (57,1 %) Teilnehmende, welche relevante Medikamente einnehmen, sowie die fehlende Angabe bei zwei (14,3 %). Bei den Patient:innen mit S2AI-Schrauben sind es 11 (68,8 %). Die Information konnte über einen Befragten (6,3 %) nicht eruiert werden.

In Gruppe 1 konnten die Proband:innen im arithmetischen Mittel 31,3 Monaten (SD \pm 16,1) postoperativ untersucht werden. Frühestens geschah dies nach 3 Monaten bei allen Teilnehmenden, sowie spätestens nach 66 (Gruppe 1) bzw. 31 Monaten (Gruppe 2). In der zweiten Gruppe ist der durchschnittliche Zeitpunkt der Untersuchung 12,6 Monate (SD \pm 10,2) nach dem Eingriff.

Die Teilnehmenden mit Iliumverschraubung sind demzufolge im Mittel älter, häufiger voroperiert und zugleich langstreckiger instrumentiert (s. Tabelle 11).

Tabelle 11: Übersicht der deskriptiven Daten

	Ohne S2AI-Schrauben	Mit S2AI-Schrauben
Alter in Jahren (SD)	55,7 (14,9)	63,2 (18,9)
Anzahl der fusionierten Segmente (SD)	3,6 (1,9)	6,9 (2,3)
Anzahl der Voroperationen (SD)	1,4 (1,2)	2 (1,6)
Follow-up in Monaten nach OP (SD)	31,3 (16,1)	12,6 (10,2)

6.2.2 Gegenüberstellung der klinischen Untersuchungsergebnisse

In diesem Abschnitt soll evaluiert werden, ob die beiden Gruppen sich in relevanten klinischen Outcomeparametern unterscheiden.

6.2.2.1 Fragebogendiagnostik und Scoring System for Sacroiliac Joint Pain

Im Rahmen des ODI ergeben sich für Gruppe 1 bei einer Verteilung zwischen 2 und 66 Punkten, durchschnittlich 29 Punkte (SD \pm 18,8). Proband:innen der zweiten Gruppe geben 51,6 Punkte (SD \pm 19,1) an, bei einem Minimum von 22 und einem Maximum von 82 Punkten. Dies kann Abbildung 18 entnommen werden. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant ($p = .003$).

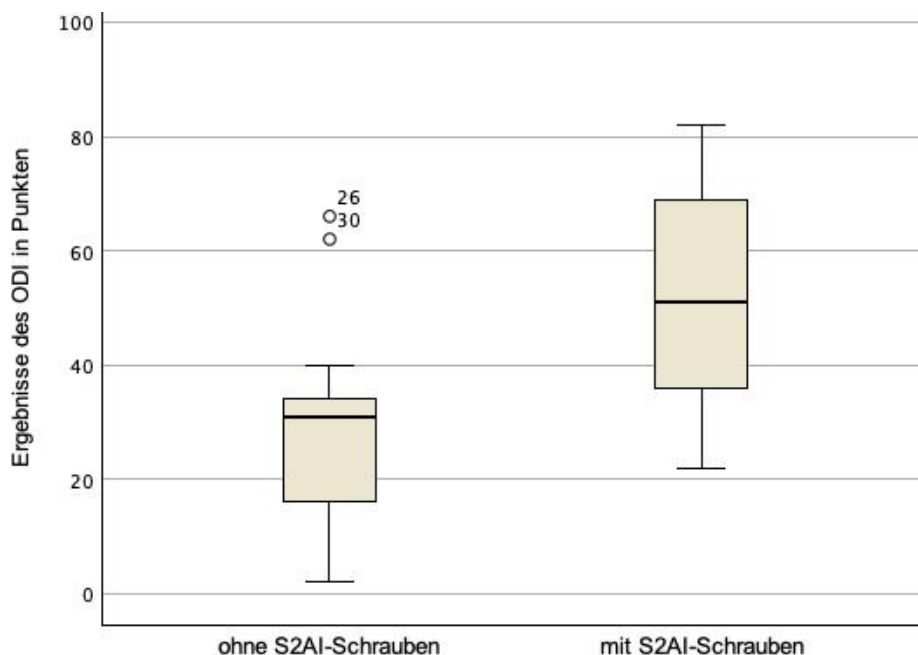


Abbildung 18: Gruppenvergleich bezüglich des Oswestry Disability Index (ODI)

Auch bei der Auswertung des RMS, dargestellt in Abbildung 19, ergeben die Ergebnisse von Gruppe 1 bessere Funktionswerte, durchschnittlich sind es bei ihnen 9,6 Punkte (SD \pm 5,4). Der niedrigste erhobene Wert ist 2 und der höchste 21. In Gruppe 2 sind es entsprechend 4 und 23 Punkte, im Durchschnitt ergeben sich 13,4 Punkte (SD \pm 6,1). Trotz der vorliegenden Diskrepanz konnte beim RMS allerdings keine Signifikanz festgestellt werden ($p = .083$).

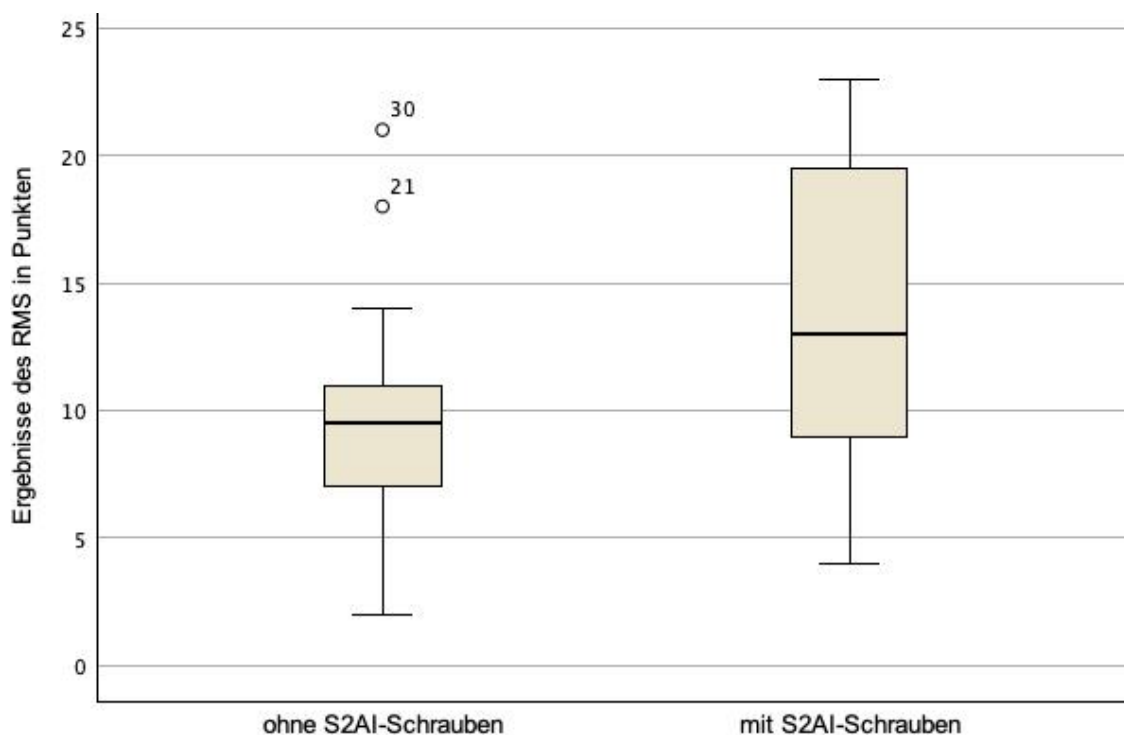


Abbildung 19: Gruppenvergleich bezüglich des Roland-Morris Score (RMS)

Bei der funktionellen Auswertung fanden sich in Gruppe 1 also im Mittel bessere Funktionswerte. Signifikante Unterschiede konnten jedoch nur beim ODI ($p = .003$) festgestellt werden und nicht beim RMS ($p = .083$).

Mithilfe der VAS Befragte der ersten Gruppe geben durchschnittlich 4,2 Punkte (SD \pm 2,1) an und bemessen die Schmerzen bei Belastung zwischen 0 und 8 Punkten. Proband:innen der zweiten Gruppe geben Werte zwischen 3 und 10 an, der Mittelwert ist 6,3 (SD \pm 2,5), s. Abb. 20.

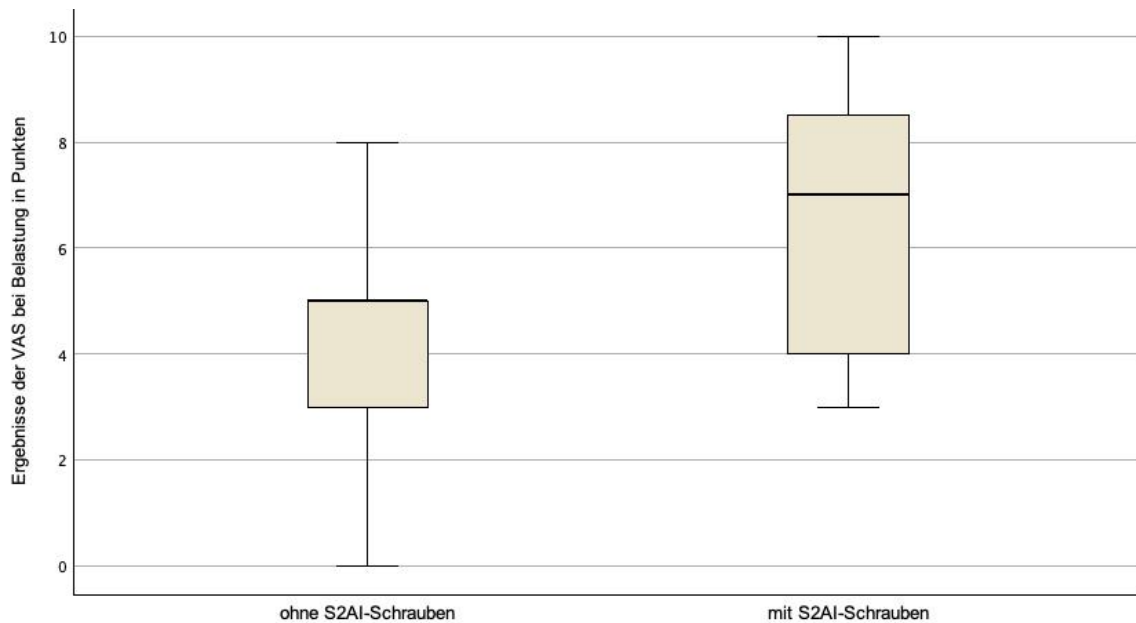


Abbildung 20: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) bei Belastung

Die Untersuchten ohne S2AI-Schrauben (Gruppe 1) nennen Werte zwischen 0 und 5 zur Einschätzung ihrer Schmerzen in Ruhe, im Mittel sind es 2 Punkte (SD \pm 1,8). Der zweiten Gruppe Zugehörige geben Daten zwischen 0 und 9 an, der Durchschnittswert beträgt 3,4 Punkte (SD \pm 2,7) (s. Abb. 21).

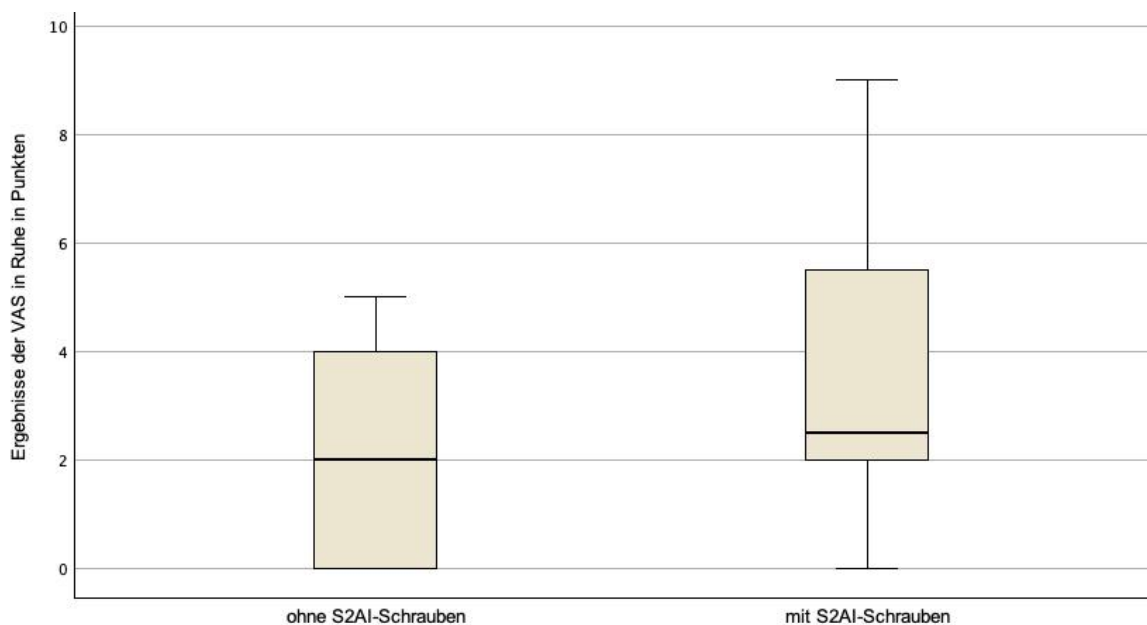


Abbildung 21: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) in Ruhe

Zugeordnete der ersten Gruppe bemaßen ihre nächtlichen Schmerzen anhand der VAS auf 2,1 Punkte (SD \pm 2,1), bei minimal 0 und maximal 6 Zählern. In der

zweiten Gruppe ergibt sich die Spannweite zwischen 0 und 8 Punkten, der Durchschnitt liegt bei 3,1 Punkten ($SD \pm 2,7$) (s. Abb. 22).

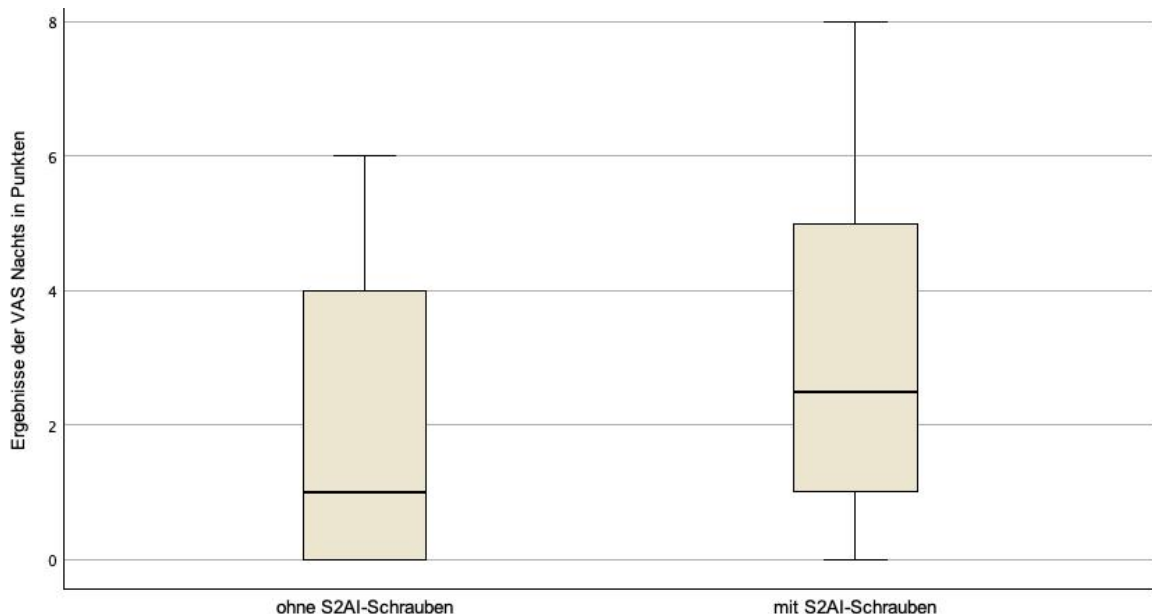


Abbildung 22: Gruppenvergleich bezüglich der Visuellen Analog Skala (VAS) nachts

Dementsprechend berichten die Untersuchten ohne S2AI-Schrauben (Gruppe 1) grundlegend in allen Kategorien über ein niedrigeres Schmerzniveau, ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kohorten zeigt sich jedoch lediglich bei der Messung der Schmerzen bei Belastung mittels der VAS ($p = .024$).

Das Scoring System für Sacroiliac Joint Pain zeigt folgende Ergebnisse: In Gruppe 1 geben die Studienteilnehmenden durchschnittlich 4,4 Punkte ($SD \pm 2,5$) an. Der kleinste addierte Wert beträgt einen Punkt, der höchste 9 Punkte. Befragte und Untersuchte mit S2AI-Schrauben (Gruppe 2) weisen im arithmetischen Mittel 2,4 Punkte ($SD \pm 1,8$) auf. Das Minimum macht null Punkte aus, das Maximum hingegen 7 Punkte. Für die Arbeitshypothese dieser Arbeit und somit den thematischen Schwerpunkt der Schmerzen des Iliosakralgelenks hat diese Untersuchung die zentralste Bedeutung. Hier konnte eine klare Überlegenheit der zweiten Gruppe in Form eines statistisch signifikanten Ergebnisses nachgewiesen werden ($p = .022$) (s. Abb. 23).

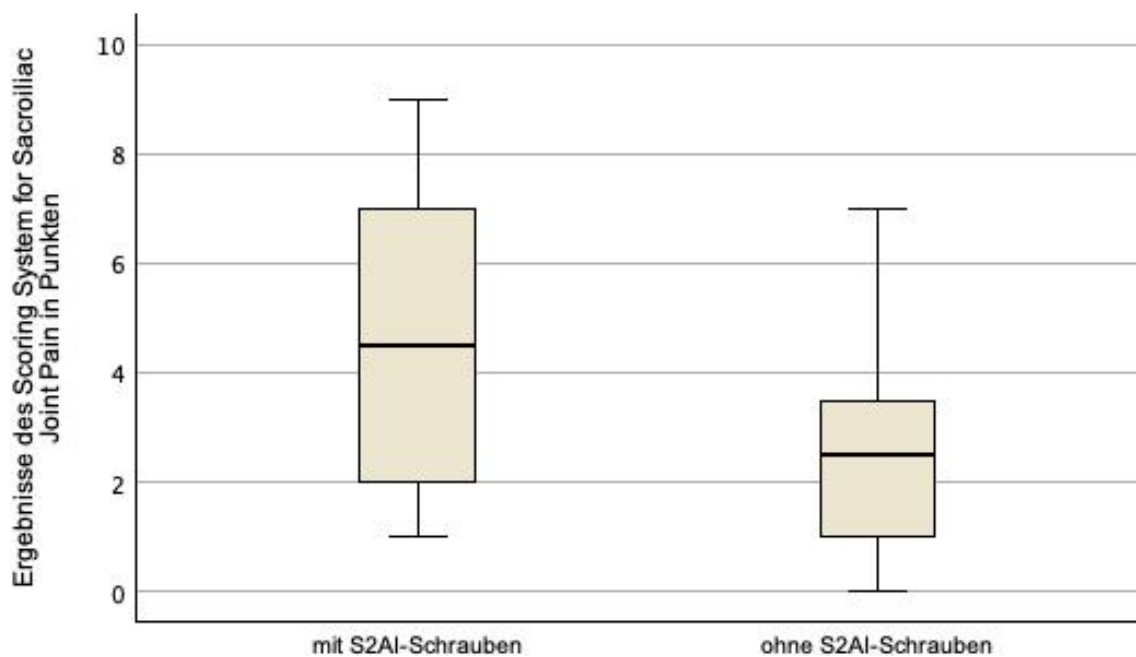


Abbildung 23: Gruppenvergleich bezüglich des Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain

6.2.2.2 Beweglichkeitsprüfungen und neurologische Untersuchungen

Die zur Erhebung der Beweglichkeit der Lendenwirbelsäule durchgeführten Tests zeigen zum einen ein Schober-Zeichen bei Proband:innen der ersten Gruppe im Mittelmaß von 2,8 cm (SD \pm 1,3). Teilnehmende von Gruppe 2 präsentieren durchschnittlich eines von 2,2 cm (SD \pm 1,7). Zum anderen ergibt das Ott-Zeichen bei Patient:innen ohne S2AI-Schrauben einen Mittelwert von 2,2 cm (SD \pm 1,4). Untersuchte der 2. Gruppe zeigen ein Ott-Zeichen von 1,8 cm (SD \pm 1,0). Proband:innen der ersten Gruppe erreichen bei Vermessung des Fingerbodenabstands im Mittel 24,5 cm (SD \pm 15,1). Bei den Teilnehmenden, die der zweiten Gruppe zugeordnet sind, lassen sich im Durchschnitt 32,1 cm (SD \pm 20,4) messen. Der Liege-Kinn-Abstand der ersten Gruppe beträgt 9,2 cm (SD \pm 5,6), in der zweiten Gruppe sind es 8,2 cm (SD \pm 6,1), wobei die Daten von 5 Proband:innen fehlten.

Der Federtest war bei 35,7 % (5 Patient:innen) derjenigen ohne S2AI-Schrauben positiv (n = 14, keine fehlenden Daten), sowie bei 16,7 % (2 Patient:innen) der Untersuchten mit S2AI-Schrauben (n = 12, fehlende Daten für 4 Proband:innen).

In der ersten Gruppe ist das Nervendehnungszeichen nach Lasègue bei 7 Teilnehmenden (50 %) positiv. Das Bragard-Zeichen wird positiv insgesamt 5 Untersuchten (35,7 %) zugeordnet. In Gruppe 2 wird ein positiver Lasègue insgesamt bei 7 Proband:innen (46,7 %) festgestellt, die Daten eines Untersuchten fehlen. Das Bragard-Zeichen ist insgesamt bei 6 (40 %) Patient:innen positiv, die Daten eines Untersuchten fehlen. Druckschmerzen der Processus spinosi der fusionierten Wirbelkörper wurden bei 7 Proband:innen (50 %) der ersten Gruppe und 11 Proband:innen (68,8 %) mit S2AI-Schrauben festgestellt.

Die Untersuchung der Sensibilität ergab pathologische Veränderungen bei 10 (71,4 %) Proband:innen der Kohorte ohne (Gruppe 1) und bei 10 (62,5 %) Untersuchten mit S2AI-Schrauben (Gruppe 2). Nach der Operation neu aufgetretene Blasen- oder Mastdarmentleerungsstörungen traten bei 5 Patient:innen (31,3 %) mit S2AI-Schrauben auf. In der Vergleichsgruppe gab es niemanden mit diesem Symptomkomplex. Ein Überblick befindet sich in Tabelle 12.

Tabelle 12: Mittelwerte der Untersuchungsergebnisse im Gruppenvergleich, SD = Standardabweichung

	Ohne S2AI-Schrauben	Mit S2AI-Schrauben
Schober-Maß in cm (\pm SD)	2,8 (1,3)	2,2 (1,7)
Ott-Maß in cm (\pm SD)	2,2 (1,4)	1,8 (1,0)
FBA in cm (\pm SD)	24,5 (15,1)	32,1 (20,4)
Liege-Kinn-Abstand in cm (\pm SD)	9,2 (5,6)	8,2 (6,1)
Anzahl mit positivem Federtest	5 (35,7 %)	2 (16,7)
Anzahl mit positivem Lasègue-Zeichen	7 (50 %)	5 (35,7 %)
Anzahl mit positivem Bragard-Zeichen	7 (46,7 %)	6 (40 %)
Anzahl mit Druckschmerz	7 (50 %)	11 (68,8 %)
Anzahl mit Sensibilitätsstörungen	10 (71,4 %)	10 (62,5 %)
Anzahl mit Blasen-/ Mastdarmentleerungsstörungen	0	5 (31,3 %)

Die motorischen Fähigkeiten der unteren Extremitäten ergeben bei Gruppe 1 eine eingeschränkte Funktion bei 6 Untersuchten (42,9 %). In der zweiten Gruppe sind es 13 Proband:innen (81,3 %). Eine schwache bis sehr schwache Muskelkraft, entsprechend einem Kraftgrad von weniger als 4, wurde bei 4 (28,6 %) Proband:innen der ersten Gruppe, sowie 11 (68,8 %) der zweiten festgestellt.

Die Beweglichkeitsuntersuchung der ersten Gruppe imponiert mit einer Seitneigung nach rechts von 19,6° (SD ± 8,4) und nach links von ebenfalls 19,6° (SD ± 9,1), wohingegen Gruppe 2 Ergebnissen von 13,8° (SD ± 7,4) nach rechts und 13,8° (SD ± 8,1) nach links zeigt. Die Rotationsfähigkeit von Gruppe 1 ist mit 14,6° (SD ± 6,9) nach rechts und 14,3° (SD ± 7,6) nach links zu bemessen. In der zweiten Gruppe sind es 11,3° (SD ± 10,7) nach rechts, sowie 11,6° (SD ± 10,9) nach links. Zusammengefasst dargestellt sind diese Ergebnisse in Tabelle 13.

Tabelle 13: Mittelwerte der Beweglichkeitsuntersuchungsergebnisse im Gruppenvergleich, SD = Standardabweichung

	Ohne S2AI-Schrauben	Mit S2AI-Schrauben
Seitneigung nach rechts in Grad (± SD)	19,6 (8,4)	13,8 (7,4)
Seitneigung nach links in Grad (± SD)	19,6 (9,1)	13,8 (8,1)
Rotationsfähigkeit nach rechts in Grad (± SD)	14,6 (6,9)	11,3 (10,7)
Rotationsfähigkeit nach links in Grad (± SD)	14,3 (7,6)	11,6 (10,9)

6.2.3 Resultate der radiologischen Überprüfung

Die Bestimmung des lumbalen Lordosewinkels (LL) beträgt durchschnittlich 35,4° (SD ± 15,5) bei Untersuchten ohne S2AI-Verschraubung (Gruppe 1). In Gruppe 2 ergibt sich ein Mittelwert von 28,2° (SD ± 12,6). Der Normwert beträgt die PI ± 10. Die Abweichung beträgt durchschnittlich 14,9° (SD ± 14,6) in Gruppe 1 und 16,5° (SD ± 13,9) in Gruppe 2.

Der Pelvic Tilt (PT) misst im Mittel 22,7° (SD ± 9,0) in Gruppe 1 und 23,6° (SD ± 11,7) bei Studienteilnehmern, die Gruppe 2 zugeordnet sind. Eine Abweichung des PT vom Normwert von 7 bis 19° beträgt im Durchschnitt 8,0° (SD ± 8,5) in der ersten Gruppe, sowie 7,3° (SD ± 8,6) in der zweiten Kohorte.

Das arithmetische Mittel der Pelvic Incidence (PI) berechnet sich auf 58,3° (SD ± 15,9) bei Studienteilnehmenden ohne S2AI-Schrauben (Gruppe 1), daneben sind es 51,0° (SD ± 17,1) bei denen mit genannter Instrumentation (Gruppe 2).

Die Sacral Slope (SS) beträgt bei Patient:innen ohne S2AI-Fixierung (n = 13) durchschnittlich 35,7 cm (SD ± 14,3). Bei jenen mit S2AI-Schrauben sind es 27,6 cm (SD ± 9,7).

In Gruppe 1 konnten bei einem Untersuchten die PI, PT und SS nicht eruiert werden, da der Femurkopf auf allen verfügbaren Röntgenbildern nicht sichtbar war. Einen Überblick über die radiologisch erhobenen Werte bietet Tabelle 14.

Tabelle 14: Mittelwerte der radiologischen Ergebnisse im Gruppenvergleich, LL = lumbaler Lordosewinkel, PT = pelvic tilt, PI = pelvic incidence, SS = sacral slope, SD = Standardabweichung

	Ohne S2AI-Schrauben (n = 13)	Mit S2AI-Schrauben (n = 16)	Gesamt (n = 29)
LL in Grad (\pm SD)	35,4 (15,5)	28,2 (12,6)	31,6 (14,2)
Abweichung LL vom Normwert in Grad (\pm SD)	14,9 (14,6)	16,5 (13,9)	15,7 (14,0)
PT in Grad (\pm SD)	22,7 (9,0)	23,6 (11,7)	23,2 (10,4)
Abweichung PT vom Normwert in Grad (\pm SD)	8,0 (8,5)	7,3 (8,6)	7,6 (8,4)
PI in Grad (\pm SD)	58,3 (15,9)	51,0 (17,1)	54,3 (16,7)
SS in cm (\pm SD)	35,7 (14,3)	27,6 (9,7)	31,2 (12,4)

7 Diskussion

7.1 Vergleichende Bewertung der klinischen Ergebnisse

Die Ergebnisdaten derjenigen Tests, die die von den Patient:innen als besonders bedeutsam eingestuften Felder im größten Umfang erfassen, finden Eingang in die klinische Auswertung. Zu diesen essenziellen Bereichen zählen Schmerz, Funktion und Lebensqualität (Chapman et al., 2011). Demnach evaluieren die Studie durchführenden mit Hilfe der VAS, des ODI und des RMS. Da keine Erhebung der präoperativen Daten erfolgte, beziehen sich die Vergleiche der Ergebnisse lediglich auf eine postoperative Datenbasis. Dieser Umstand schränkt jedoch das Verständnis der Ausgangssituation der Patient:innen vor der Operation ein, sodass eine objektivierte Beurteilung der tatsächlichen Verbesserung nach dem Eingriff nicht möglich ist. Trotz dieses Vorbehalts liefern die postoperativen Daten immer noch wertvolle Informationen über die Wirksamkeit der Behandlung, sodass die Ergebnisse trotzdem als Grundlage für weitere Forschung dienen können und Einblicke in die Auswirkungen von S2AI-Schrauben ermöglichen.

7.1.1 Messung der Empfindungsstärke mittels Visueller Analogskala

Von der Hoeh et al. untersuchten in einer randomisierten kontrollierten Studie die klinischen und radiologischen Ergebnisse von Fusionseingriffen unter Anwendung der TLIF-Technik (vonderHoeh, Voelker, & Heyde, 2017). Der mediane Wert der VAS verbesserte sich signifikant auf 3,1 Punkte (SD \pm 1,3) nach einem Jahr ($p < 0,001$). Hackenberg et al. berichten eine Verbesserung dieses Wertes auf 3,8 Punkte (SD \pm 2,0) in demselben Zeitraum nach multisegmentaler TLIF (Hackenberg et al., 2005). Die Gesamtstudienpopulation der hier vorgestellten Studie zeigte ein Ergebnis von 2,8 Punkten und wies somit ein überlegenes postoperatives funktionelles Resultat der beobachteten Werte dieser vergleichbaren Studien auf. Hervorzuheben ist, dass die Patient:innen ohne S2A1-Schrauben sogar von lediglich 2 Punkten berichteten. Zudem führten Von der Hoeh et al. ihre Untersuchungen an Proband:innen durch, deren Wirbelsäulenfusion über maximal zwei Segmente erfolgt ist. Auch die Kohorte von Hackenberg et al. umfasste lediglich 2 (von 52) Patient:innen mit Spondylodesen über drei Segmente, während sich die verbliebenen weniger umfangreichen Eingriffen unterzogen.

Kunze et al. ermittelten 3,4 Punkte mit Hilfe der VAS nach TLIF und einem mittleren Follow-up von 15 Monaten. Kersten et al. dokumentierten Rückenschmerzen mit einem VAS-Wert von 3,0 nach 12 Monaten (Kersten et al., 2022; Kunze, Drasseck, & Kluba, 2011). Der Vergleichswert der vorliegenden Studie des VAS-Scores von durchschnittlich 2,8 Punkten, ist ähnlich zu den angeführten Ergebnissen.

Die von Zhai et al. untersuchten Studien zu multisegmentalen TLIF erfassten die postoperativen Rückenschmerzen mit durchschnittlichen Werten zwischen 1,1 und 1,9 Punkten, allerdings fanden die follow-up Untersuchungen zu uneinheitlichen Zeitpunkten stand, die meisten Studien wurden in der chinesischen Bevölkerung erhoben und die Ausschlusskriterien umfassten lumbale Voroperationen und Komorbiditäten, wie Infektionen oder Frakturen (Zhai et al., 2024).

7.1.2 Erfassung der alltäglichen Einschränkungen durch den Oswestry Disability Index

Der mediane ODI-Score nach von der Hoeh verbesserte sich in der Gesamtkohorte nach 12 Monaten postoperativ auf 29,6 (SD \pm 15,5) ($p < 0,001$) (vonderHoeh et al., 2017). In der vorliegenden Studie konnte dagegen ein Wert von 41,07 Punkten in der gesamten Studienpopulation festgestellt werden. Ein entscheidender Unterschied ist der Umfang der Pathologie; während die vorliegende Studie ausschließlich langstreckige Wirbelsäulenfusionen untersucht hat, schlossen von der Hoeh et al. ausnahmslos Patient:innen ein, deren lumbale Erkrankungen eine Operation über ein bis zwei Segmente erforderte. Bemerkenswert ist jedoch, dass die Untersuchten mit S2AI-Schrauben, trotz einer Fusion über mindestens drei Segmente, einen Mittelwert von 29,0 Punkten und somit ein vergleichbares Outcome wie die von Von der Hoeh Untersuchten aufweisen.

Die Metanalyse von Zhai et al. zu multisegmentalen TLIF umfasste 9 Studien, deren durchschnittliche ODI-Ergebnisse minimale Werte von 4,8 Punkten, sowie maximal 27,4 Punkte aufweisen (Zhai et al., 2024). Die Limitationen dieser Studie wurden unter 7.1.1 bereits erwähnt und erläutern die im Vergleich eher besseren Ergebnisse.

Bredow et al. stellten 3 Jahre nach mono- oder bisegmentaler PLIF oder TLIF bei 17 Patient:innen einen durchschnittlichen ODI von 26,0 Punkten fest (Bredow et al., 2022).

Finger et al. führten einen Vergleich zwischen sakropelviner Fixierung und konventioneller Stabilisierung am Sakrum nach multisegmentaler Wirbelsäulenfusion durch. In ihrer Studie wurde bei der 1-Jahreskontrolle ein durchschnittlicher ODI-Wert von 41,7 Punkten bei Patient:innen mit regulären Iliumschrauben festgestellt. Im Vergleich dazu betrug der ODI-Wert in dieser Studie mit S2AI-Schrauben 51,63 Punkte, bei einer durchschnittlichen Nachuntersuchungszeit von 12,6 Monaten.

Ha et al. untersuchten Patient:innen mindestens 2 Jahre nach langstreckiger Fusion über mindestens 6 Segmente und stellten bei 9,6 % (8/83) der Untersuchten durch S2AI-Schrauben bedingte Schmerzen am ISG fest. Diese Kohorte hatte

einen durchschnittlichen ODI von 26 Punkten, während es in der Kontrollgruppe sogar nur 18,7 Punkte waren. Dies legt die Möglichkeit einer Verbesserung der hier vorgestellten Ergebnisse bei Hinausschieben des Nachbeurteilungszeitpunkts nahe (A. S. Ha et al., 2022).

In der Kontrollgruppe von Finger et al., die eine Verschraubung an das Sakrum erhielt, wurde ein Durchschnittswert von 40,3 Punkten ermittelt (Finger et al., 2014). Diese Patient:innen unterzogen sich einer Fusion von durchschnittlich 7,0 Segmenten (SD \pm 3,3), im Vergleich zu 5,4 Segmenten in dieser Studie. Hackenberg et al. stellten 2005 einen niedrigeren ODI von 33,7 Punkten (SD \pm 22,5) bei Patient:innen mit TLIF nach 12 Monaten fest (Hackenberg et al., 2005), dabei erhielten 39 Patient:innen eine monosegmentale, 11 eine bisegmentale und 2 eine Fusion über 3 Segmente. Kunze et al. stellten einen ODI von 28,5 Punkten nach TLIF bei einem mittleren Follow-up von 15 Monaten fest (Kunze et al., 2011). Nach monosegmentalen Eingriffen waren es lediglich 23,6 Punkte, bei bisegmentalen 32,2 Punkte. Eine sakropelvine Fixierung wurde jedoch nicht durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung ergab einen ODI-Wert von 29 Punkten ohne S2A1-Schrauben. Vergleichsweise konnten somit eher geringere durchschnittliche ODI-Werte bei Patient:innen ohne sakropelvine Fixierung festgestellt werden. Dies könnte auf Unterschiede der maßgebenden Ausgangskriterien in den Patient:innenkohorten, der Operationstechnik oder anderen Faktoren zurückzuführen sein. Wie aus den oben genannten Untersuchungen ableitbar, spielt insbesondere die Anzahl der fusionierten Segmente eine entscheidende Rolle für das postoperative Befinden. Finger et al. hatten vergleichbare ODI-Werte bei langstreckigen Fusionseingriffen, während mono- und bisegmentale Instrumentierungen niedrige Ergebnisse zeigen.

Ziroglu et al. untersuchten Patient:innen mit lumbaler Spinalkanalstenose nach kombinierter TLIF und posterolateraler Fusion und stellten hingegen einen ODI von lediglich 15,1 Punkten fest. Diese Daten zeigen das Potenzial zur Verbesserung der funktionellen Ergebnisse durch Erweiterung der Operationstechnik (Ziroglu, Duramaz, & Bayrak, 2021).

Kersten et al. verzeichneten sogar einen noch niedrigeren ODI mit durchschnittlich 14,8 Punkten nach 3 Monaten, bzw. 10,2 Punkten 12 Monate nach TLIF mit

PEEK-Cage (Kersten et al., 2022). Von den 48 Patient:innen erhielten allerdings nur fünf eine Fusion über mehr als ein Segment.

Im Vergleich zu den genannten Studien, die ebenfalls den ODI als Ergebnismaß verwendeten, fallen die Ergebnisse dieser Studie eher ungünstig aus. Diese Unterschiede könnten auf mehrere Faktoren zurückzuführen sein. Zum einen könnten Unterschiede in den Patient:innenkohorten eine Rolle spielen, wie zum Beispiel das Alter, der allgemeine Gesundheitszustand, die Schwere der Erkrankung oder Begleiterkrankungen. Zum anderen könnte die zeitliche Lage der Nachuntersuchung einen Einfluss haben, da sich die ODI-Werte möglicherweise im Laufe der Zeit ändern, abhängig von der Heilung und Rehabilitation der Patient:innen. Der wichtigste Faktor ist womöglich die Anzahl der fusionierten Segmente. Diese korreliert mit einer Einschränkung der Beweglichkeit, was zu einem höheren funktionellen Defizit und somit ODI führt. Zudem müssen die verbleibenden Segmente eine größere biomechanische Belastung tragen, was fortschreitend zu einer Degeneration der angrenzenden Segmente führen kann (Adjacent Segment Disease). Vermutlich kommt es auch zu mehr postoperativen Komplikationen bei einem umfangreichen und technisch anspruchsvollen Eingriff, die das funktionelle Ergebnis verschlechtern.

7.1.3 Einschätzung der physischen Beeinträchtigung anhand des Roland-Morris Scores

Diese Studie stellte Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen, bezüglich der Ergebnisse des RMS fest, die allerdings nicht statistisch signifikant sind (9,6 Punkte bei Untersuchten ohne S2AI-Schrauben, sowie 13,4 Punkte bei Patient:innen mit S2AI-Schrauben). Im Vergleich zu anderen Studien fallen diese Werte tendenziell höher aus, was mehrere Erklärungen zulässt. Kunze et al. stellen einen RMS von 6,9 Punkten nach TLIF nach einem mittleren Follow-up von 15 Monaten fest, bei monosegmentalen sind es 5,8 Punkte, bei bisegmentalen hingegen 8,5 Punkte. Bei der Untersuchung von Kersten et al. von hauptsächlich monosegmentalen Fusionen, ergaben sich 9,5 Punkte nach 3 Monaten bzw. 5,7 Punkte nach 12 Monaten. Ziroglu et al. ermittelten ebenfalls einen RMS von 5,7

Punkten (SD \pm 2,6), allerdings nach mindestens 4 Jahren (Kersten et al., 2022; Kunze et al., 2011; Ziroglu et al., 2021).

Ein möglicher Grund für die geringeren Werte in den genannten Studien ist die längere Nachbeobachtungszeit, insbesondere bei Ziroglu et al., die eine deutlich längere Erholungsphase von mindestens vier Jahren anführten. Dies lässt eine größere funktionelle Erholung zu. In den ersten postoperativen Monaten ist das Erleben größerer funktioneller Einschränkungen wahrscheinlich, diese werden durch den RMS erfasst, der besonders empfindlich gegenüber Alltagsaktivitäten und deren Beeinträchtigung ist.

Im Vergleich zum ODI, konzentriert sich der RMS auf die körperliche Funktionalität, während der ODI psychische und soziale Einschränkungen stärker gewichtet. Da diese Symptome häufig in enger Korrelation stehen, ist es naheliegend, dass die Ergebnisse des ODI ein vergleichbares Muster aufweisen.

7.1.4 Beweglichkeitsuntersuchungen

Bei den im Rahmen dieser Studie untersuchten Parametern zur Erfassung der Beweglichkeit konnten keine relevanten oder signifikanten Unterschiede zwischen den Kohorten festgestellt werden. Basierend auf der unterschiedlichen Fusionsstrecke der beiden Gruppe sollte dementsprechend beurteilt werden, ob sich die Beweglichkeit der Lendenwirbelsäule verändert bei einer zusätzlichen Verschraubung. Da keine relevanten oder signifikanten Unterschiede im Hinblick auf Schober und Ott Zeichen, sowie beim Fingerbodenabstand festgestellt werden konnten, ergibt sich, dass die zusätzliche Verschraubung oberhalb des zweiten Lendenwirbelkörpers, wie sie im Wesentlichen in Gruppe 2 auftritt, keine bedeutende Rolle für postoperative Entwicklung der Beweglichkeit im Bereich der Lendenwirbelsäule spielt. Zusätzlich lässt sich sagen, dass sich bei der Auswertung der Daten von Proband:innen ohne S2AI-Schrauben im Mittel bessere Funktionswerte fanden. Signifikante Unterschiede ergaben sich jedoch nur beim ODI ($p = .003$), nicht beim RMS ($p = .083$). Darüber hinaus konnten in Gruppe 1 niedrigere Schmerzscores nachgewiesen werden. Signifikante Unterschiede zeigten sich allerdings nur bei der VAS für die Frage nach Schmerzen bei Belastung ($p = .024$).

Bei der vereinheitlichten Auswertung der Symptome, insbesondere der Schmerzeinschätzung, durch die standardisierten Fragebögen des ODI, RMS und der VAS ist zu beachten, dass diese die subjektive Einschätzung und das persönliche Erleben der Patient:innen widerspiegeln.

Die Beurteilung der Beweglichkeit der Wirbelsäule wurde mittels Goniometer nach dem standardisierten Bewertungs- und Dokumentationsindex der Neutral-Null-Methode durchgeführt. Die Analyse der Motorik orientierte sich an den Kraftgraden nach Janda. Letzteres ist lediglich ein semiquantitatives Messverfahren, da die Erhebung untersucherabhängig ist. Dies trifft ebenso auf die anderen Erhebungen zum neurologischen Status zu. Um diese Bias zu verringern, erfolgte die Untersuchung stets durch die gleiche Person. Das Scoring System for Sacroiliac Joint Pain demonstriert eine moderate Genauigkeit bei der Diagnose von Schmerzen des Iliosakralgelenks und kann wirksam ISG-Schmerzen von anderen Ursachen für Gesäßschmerzen im Rahmen der üblichen ambulanten Behandlung unterscheiden (J. Tonosu et al., 2018).

Im Allgemeinen ist der Vergleich mit den Erhebungen vor den operativen Eingriffen eine sinnvolle Ergänzung zu den vorliegenden Daten.

7.2 Sakropelvine Parameter sind unabhängig von der zusätzlichen Fixation mit S2AI-Schrauben

Erwartungsgemäß zeigen sich in keinem der geprüften radiologischen Maße signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Dies kann durch die Erkenntnis erklärt werden, dass das sagittale Profil grundsätzlich nicht von einer zusätzlichen sakropelvinen Fixierung abhängt. Das sagittale Profil bezieht sich auf die Krümmung der Wirbelsäule, die für deren Ausrichtung und das allgemeine Gleichgewicht der Wirbelsäule wichtig ist. Sie wird in erster Linie durch die natürliche anatomische Struktur der Wirbelsäule und die Ausrichtung ihrer einzelnen Segmente bestimmt, sowie durch Faktoren wie die Bandscheiben, die Wirbelkörper sowie die Form und Ausrichtung der Wirbelgelenke beeinflusst. Diese Elemente tragen gemeinsam zur gesamten sagittalen Ausrichtung bei. Während die sakropelvine Fixierung mit S2AI-Schrauben dem ISG zusätzliche Stabilität

und Unterstützung bieten kann, hat sie keinen direkten Einfluss auf die sagittale Ausrichtung der Wirbelsäule.

Es ist wichtig, diese Ergebnisse im Kontext der Ziele der Studie zu interpretieren, die sich auf die Bewertung der Wirksamkeit von S2AI-Schrauben bei der Reduzierung postoperativer Schmerzen im Iliosakralgelenk konzentriert. Das Fehlen signifikanter Unterschiede in den radiologischen Parametern schmälert nicht die potenziellen Vorteile der S2AI-Schraubenfixierung im Hinblick auf Schmerzreduktion und verbesserte klinische Ergebnisse.

Ha et al. untersuchten das Auftreten von Schmerzen im Zusammenhang mit S2AI-Schrauben mindestens 2 Jahre nach Wirbelsäulendeformitätsspondyloiden. Innerhalb der Gruppe mit Schmerzen bestand eine geringe Korrelation zwischen diesen und radiologisch festgestellten Komplikationen der S2AI-Schrauben. Nur in 25 % der Fälle wurden eine Fraktur bzw. ein Verbiegen der Schraube gefunden. Von 9 Patient:innen mit auffälligen Röntgenbefunden, klagten hingegen nur 2 über Schmerzen. Ha et al. schlussfolgern, dass der Schwerpunkt der postoperativen Beurteilung von S2AI-Schrauben auf der klinischen und nicht der radiologischen Untersuchung liegen sollte (A. S. Ha et al., 2022). Dieser Empfehlung schließen sich die vorliegenden Ergebnisse an, auch diese Studie konnte insbesondere keinen Zusammenhang zwischen der röntgenologischen Wirbelsäulen- und Beckenausrichtung und S2AI-Schrauben feststellen.

Eine Metaanalyse von 34 Studien zwischen 2010 und 2019 konnte sogar bei Patient:innen nach Wirbelsäulendefusion im Vergleich zwischen den Aufnahmen im präoperativen Stadium und jenen bei der letzten Nachuntersuchung, keine signifikante Veränderung der PI, SS und des PT feststellen (Eun, Son, Goh, & Lee, 2020). Jedoch zeigte sich die lumbale Lordose (LL) signifikant erhöht, explizit in Fällen nach langer Fusionsstrecke. Eine Untersuchung von Luo et al. maß eine signifikant höhere Veränderung der Lendenlordose bei Patient:innen mit regulären Iliumschrauben im Vergleich zu jenen mit S2AI-Schrauben (Luo et al., 2021). Cecchinato et al. beschrieben hingegen einen Anstieg der PI nach langstreckigen Fusionseingriffen bis S1 ohne sakropelvine Fixierung. Die Autor:innen

mutmaßten einen Zusammenhang mit einer Degeneration der Iliosakralgelenke, die zu einer erhöhten Rotationsbeweglichkeit führt (Cecchinato et al., 2017).

Darüber hinaus untersuchten Lee et al. den Einfluss der Beckenfixierung auf Veränderungen der spinopelvinen Parameter. Auch sie fanden heraus, dass bei der Korrektur von sagittalen Deformitäten bei Erwachsenen die PI nach der Operation zunahm, dies jedoch mit signifikant höherer Diskrepanz der PI bei nicht-sakropelvinen Fixierungen als bei sakropelvinen Fixierungen. Dieser Anstieg des PI korrelierte zudem signifikant mit dem Zeitpunkt der Follow-up-Untersuchung, was bei der Bewertung der hier erhobenen Daten im Hinblick auf die stark unterschiedlichen Nachuntersuchungszeitpunkte zu berücksichtigen ist (J. H. Lee, Na, Kim, Jeong, & Chang, 2016).

Die Ergebnisse von Ishida et al. zur Auswirkung der pelvinen Fixationsmethoden auf die spinopelvinen Parameter zeigten eine statistisch signifikante Abnahme des PI bei der Fixierung mit S2AI-Schrauben, was darauf hindeutet, dass die Verwendung dieser Schrauben im Vergleich zu Iliumschrauben oder einer Fixierung ohne Beckenschrauben eine postoperative Zunahme des PI zu mindern oder gar zu verhindern vermag (Ishida et al., 2017). Die hier vorgestellten Resultate können eine solche These jedoch nicht untermauern.

Kalidindi et al. konkludierten aus ihren Untersuchungen von Patient:innen mit postoperativen ISG-Schmerzen, dass diese im Vergleich zur Vergleichsgruppe eine signifikant geringere prä- und postoperative Lendenlordose demonstrierten. Beide Gruppen hatten jedoch ähnliche Größenordnungen der Veränderung der LL nach der Operation. Jene mit postoperativen ISG-Schmerzen, wiesen jedoch einen größeren postoperativen PT auf (Kalidindi et al., 2021).

Berücksichtigt werden sollten Einflussfaktoren, wie der Zusammenhang zwischen der Morphologie der Wirbelsäulenmuskulatur und den spinopelvinen Parametern, der bei den biologischen Geschlechtern zu unterschiedlicher Interaktion der Muskulatur führt und eine einzigartige mechanische Umgebung schafft (Moser et al., 2022).

Die von Bredow et al. untersuchten Patient:innen nach mono- und bisegmentaler PLIF oder TLIF wiesen postoperativ einen PT von 24,0° und eine PI von 61,8°

auf und stellten somit vergleichbare Ergebnisse der gesamten Studienkohorte fest. Der PT beträgt durchschnittlich 23,2° und die PI 54,3° (Bredow et al., 2022). Unabhängig vom Operationsverfahren zeigte sich in dieser durchgeführten Untersuchung bei Patient:innen mit einem pathologisch verändertem PT ein höherer ODI (47 Punkte) und somit vermehrte Einschränkungen im Vergleich zu Patient:innen mit physiologischem PT (ODI von 31 Punkten). Diese Diskrepanz ist allerdings, a.e. wegen der reduzierten Fallzahl, statistisch nicht signifikant.

Beachtet werden sollte allerdings, dass die ausschließliche radiologische Auswertung nach Spondylodesen nur in etwa zwei Dritteln der Fälle genau ist, wie in mehreren Studien gezeigt wurde. Daher werden Röntgenaufnahmen nicht als eigenständiges Beurteilungskriterium für den Erfolg des Eingriffs nach einer lumbalen Fusionsoperation empfohlen (Choudhri et al., 2014).

Viele Studien zeigen zum Beispiel zwar Signifikanzen zwischen der Wiederherstellung der sagittalen Balance und der damit korrelierenden besseren Lebensqualität, jedoch existieren auch Arbeiten, die darauf hindeuten, dass sich bereits nach einer einfachen Dekompression des Spinalkanals die sagittale Balance verbessern kann. Deshalb wäre es überzogen, jede wirbelsäulenchirurgische Behandlung auf die instrumentierte Wiederherstellung der sagittalen Balance zu fokussieren. Die richtige Operationsindikation und -aufklärung im Sinne von «primum non nocere» ist deshalb bei diesen Patient:innen unbedingt zu diskutieren (Ulrich et al., 2021).

7.3 Erstoperierte vs. Reoperierte

Bei der Untersuchung der Hypothese, dass Teilnehmende mit Voroperation ein schlechteres Outcome im Sinne eines erhöhten ODI-Wertes aufweisen, bestätigte sich diese Tendenz, jedoch konnte kein statistisch signifikantes Ergebnis eruiert werden.

Lee et al. waren überrascht, als ihre Ergebnisse ebenfalls darauf hindeuteten, dass Wiederaufnahmen und Revisionseingriffe die Patient-reported outcome measures (PROMs) bei Erwachsenen mit komplexen Wirbelsäulendeformitäten bis zu 2 Jahre nach der Operation nicht negativ beeinflussten. Patient:innen, die sich einer ungeplanten Rehospitalisierung oder Reoperation unterziehen

mussten, konnten ihre gesundheitsbezogene Lebensqualität, unter anderem gemessen am ODI, im Vergleich zum präoperativen Ausgangswert bis zum 2-Jahres-Follow-up bzw. zum 1-Jahres-Follow-up signifikant verbessern und vergleichbare Verbesserungen erzielen wie Patient:innen, die keine Rehospitalisierung benötigen (N. J. Lee et al., 2021).

Trotzdem sollten weitere prospektive Studien durchgeführt werden, um diese Ergebnisse zu bestätigen und die Faktoren zu identifizieren, die das Outcome von Patient:innen mit Voroperationen positiv beeinflussen. Eine umfassendere Kenntnis dieser Zusammenhänge könnte dazu beitragen, die Behandlungsstrategien zu optimieren und das langfristige Outcome für diese Patient:innengruppe zu verbessern.

7.4 Niedrigeres Risiko für ISG-Schmerzen durch S2AI-Schrauben

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den radiologischen und klinischen Ergebnissen nach dorsaler Spondylodese über mindestens drei Segmente. Vielfach beanstandeten Patient:innen nach langstreckiger Fusionstherapie postoperative Schmerzen im Bereich des Iliosakralgelenks. Im Themenschwerpunkt dieser Arbeit, dem Scoring System for Sacroiliac Joint Pain, konnte eine klare Überlegenheit der Patient:innen mit S2-Ala-Iliumverschraubung nachgewiesen werden. Diese Studie zeigt somit, dass die Verwendung von S2AI-Schrauben eine signifikante Verbesserung der Schmerzsymptomatik bezüglich der Schmerzen des Iliosakralgelenks erzielen kann.

Zur Feststellung des verringerten Risikos von Schmerzen des Iliosakralgelenks bei Verwendung von S2AI-Schrauben kamen auch ähnlichen Studien. Eine Metaanalyse von Studien über den Vergleich von erwachsenen Patient:innen mit „konventionellen“ Iliumschrauben versus mit S2AI-Schrauben ergab, dass die S2AI-Gruppe eine niedrigere Rate an Revisionsoperationen, postoperativen Wundinfektionen, Wunddehiszenzen und symptomatischer Schraubenprominenz aufwies, während die Rate anderer Komplikationen in beiden Gruppen ähnlich war. Beide Gruppen erreichten ebenfalls eine statistisch signifikante Schmerzlinderung und funktionelle Wiederherstellung ohne signifikante

Unterschiede zwischen beiden (De la Garza Ramos, Nakhla, Sciubba, & Yassari, 2019).

Eine weitere Studie bestätigte, dass die S2AI-Instrumentierung bei Patient:innen, die sich einer langstreckigen Spondylodese wegen Wirbelsäulendeformitäten unterzogen, eine geringere Reoperationsraten nach sich zog. Gesäßschmerzen als klinisches Zeichen für ISG-Schmerzen besserten sich in der S2AI-Schrauben-Gruppe häufiger und deren Linderung wird auch signifikant stärker beschrieben (Krieg, Sollmann, Ille, Albers, & Meyer, 2021). Ilyas et al. fanden heraus, dass die Verwendung von S2AI-Schrauben mit einer statistisch signifikanten Abnahme von Implantatlockerungen, akuten Wundinfektionen, verzögerten Wundproblemen, der Notwendigkeit einer Revisionsoperation und der Inzidenz von Gesäßschmerzen für länger als drei Monate nach der Operation einhergeht (Ilyas et al., 2015). Einige wenige andere Veröffentlichungen zeigten hingegen ein signifikant häufigeres Auftreten von Schmerzen des Iliosakralgelenks bei Proband:innen mit S2AI-Schrauben (Luo et al., 2021). Finger et al. konnten wiederum keine Veränderung der postoperativen Schmerzen des Iliosakralgelenks durch Iliumschrauben feststellen, jedoch steigerte ein erhöhter präoperativer BMI das Risiko für ISG-Schmerzen (Finger et al., 2016).

Insgesamt deuten die Ergebnisse der Literaturrecherche darauf hin, dass die Verwendung von S2AI-Schrauben im Vergleich zur einfachen sakralen Verschraubung mit einem signifikant geringeren Risiko für Revisionseingriffe, Wundinfektionen und Schraubenprominenz/Schmerzen verbunden ist. Darüber hinaus haben biomechanische Tests gezeigt, dass ähnliche Fixationsstärken erreicht werden, was darauf hindeutet, dass die neuere Technik mit S2AI-Schrauben bei ausgewählten Patient:innen eine bessere Option sein könnte. Vermutlich spiegeln die verbesserten Ergebnisse der früheren Methode dagegen eher eine globale Verbesserung der Operationstechnik im Laufe der Zeit wider, einschließlich verbesserter Genauigkeit der Schraubenplatzierung, niedrigerer Infektionsraten und reduzierter Betriebszeit (De la Garza Ramos et al., 2019).

Die angeführten Publikationen umfassen jedoch keine mit dieser Studie vergleichbare standardisierte Beurteilung der ISG-Schmerzen, wie das verwendete Scoring System for Sacroiliac Joint Pain. Dies erlaubt eine präzisere Erfassung

zur Analyse der Wirksamkeit der beiden Instrumentierungstechniken. Die Verwendung eines standardisierten Bewertungssystems über verschiedene Studien hinweg würde zu präziseren und eindeutig vergleichbaren Bewertungen der Ergebnisse führen und weitergehend die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Forschungsergebnisse steigern.

7.5 Limitationen

7.5.1 Studiendesign

Der Vorteil des im Grunde retrospektiven Studiendesigns ist die Rekrutierung der Patient:innen, die den spezifischen Kriterien entsprechen, bei minimalem organisatorischem und finanziellem Aufwand. Da die Fragebögen und Untersuchungsergebnisse prospektiv erhoben werden, kann einer Erinnerungsverzerrung vorgebeugt werden. Allerdings konnten anamnestiche Daten, wie beispielsweise die Einnahme von Analgetika und Psychopharmaka nicht bei allen Teilnehmenden erhoben werden, da diese nicht regelhaft in den elektronischen Akten dokumentiert sind.

Eine Randomisierung oder Verblindung ist hinsichtlich der Aussagefähigkeit der Studie erstrebenswert, durch die Fragestellung und den Aufbau der Studie aber nicht realisierbar.

Das Kontaktieren der potenziellen Proband:innen wurde durch teilweise lang zurückliegende Operationen und damit verbundene veraltete Kontaktdaten, sowie inzwischen verstorbene Patient:innen erschwert. Als größtes Hindernis erwies sich jedoch die COVID-19-Pandemie, da etliche der angesprochenen Patient:innen aus Angst vor Ansteckung Termine absagten, Krankenhausbesuche vermieden und sich in häusliche Isolation begaben. Dies kann als Hauptgrund für das Verfehlen der selbstgesetzten Stichprobenzielgröße angesehen werden und führte zu einer niedrigen Fallzahl.

Dem Design der Studie, der Häufigkeit der durchgeführten Operation, sowie der unterschiedlichen Bereitschaft zur Einwilligung zur Studienteilnahme geschuldet, unterscheidet sich der Untersuchungszeitpunkt der beiden Kohorten. In Gruppe 1 konnten die Proband:innen im Mittel nach 31,3 Monaten untersucht werden. In der zweiten Gruppe waren es 12,6 Monate nach dem Eingriff. Insbesondere den

klinischen Ergebnissen sowie den Resultaten der Fragebögen kann auch diesem Grund eine erschwerte Vergleichbarkeit unterstellt werden.

7.5.2 Patient:innenspezifische Komplikationen

Studienteilnehmende der ersten Gruppe sind durchschnittlich 55,7 Jahre alt, wohingegen der Durchschnitt der zweiten Gruppe 63,2 Jahre beträgt. Studien zu Fusionsoperationen wegen degenerativer Wirbelsäulenveränderungen zeigen zwar eine konstante Mortalitätsrate trotz einer alternden Demografie, allerdings kann die signifikante Zunahme von postoperativen Komplikationen der älter werdenden Bevölkerung festgestellt werden (Pumberger, 2018). Dies lässt sich vornehmlich dem Einfluss der präoperativen Morbidität zuschreiben, sodass die im Mittel älteren Proband:innen mit S2AI-Schrauben einem höheren Risiko für postoperative Einschränkungen ausgesetzt sind. Beispielhaft kann die Ausbildung einer Pseudarthrose angeführt werden, wenn keine ossäre Konsolidierung der Implantate erfolgt und somit der mechanischen Belastung nicht wie gewünscht gerecht werden kann. Dies kann jedoch lediglich vermutet werden, da das Alter als solches noch keinen risikoe erhöhenden Faktor für ein schlechteres postoperatives Ergebnis bildet. Das gilt ebenso für das Geschlecht, die Dauer der Rückenschmerzen, die Häufigkeit der Schmerzmitteleinnahme, die berufliche Tätigkeit oder die Anzahl der fusionierten Segmente (Rompe, Eysel, Hopf, & Heine, 1995).

Eine wesentliche Problematik dieses Gruppenvergleiches stellt ein gewisser Selektionsbias dar. Um eine Lockerung der meist im Sakrum gelegenen, kaudalen Schrauben zu vermeiden, wird bei sehr langstreckigen Fusion entsprechend des hausinternen Leitfadens eine Mitverschraubung des Iliosakralgelenkes angestrebt. Dies entspricht einer kranialen Instrumentierung des zweiten Lendenwirbelkörpers. Diese Richtlinie erklärt die längere Fusionsstrecke in der Gruppe mit S2AI-Schrauben.

Statistisch signifikant für schlechte postoperative Ergebnisse im Rahmen der Studie von Rompe, Eysel, Hopf und Heine zeigt sich jedoch die Anzahl der Voroperationen. Bei den in dieser Studie Untersuchten ohne Iliumschrauben fanden durchschnittlich zusätzliche 1,4 Operationen statt, bei denen mit S2AI-

Schrauben hingegen 2. Letztere sind somit eher prädestiniert für ein weniger zufriedenstellendes Operationsergebnis.

Der Grad des Engagements der Proband:innen erscheint nur schwer objektivierbar.

7.5.3 Limitationen der klinischen Ergebnisse

Den klinischen Ergebnissen liegt ein individueller Bewertungsspielraum des Untersuchenden zwangsläufig zu Grunde, der angesichts des Untersuchungszeitraums zusätzlich auch in sich Beurteilungsschwankungen unterliegen mag. Die ursprüngliche Diagnose und Operationsqualität sind nicht untersucht und können weder bewertet noch berücksichtigt werden. Eine Heranziehung von Vergleichswerten hinsichtlich der präoperativen Schmerzsymptomatik war systematisch ausgeschlossen.

7.5.4 Limitationen der radiologischen Ergebnisse

Die Einhaltung der Messvoraussetzungen bei der Erhebung der radiologischen Befunde konnte nicht überprüft und musste unbewertet zu Grunde gelegt werden. Beachtet werden sollte allerdings, dass die ausschließliche radiologische Auswertung nach Spondylodesen nur in etwa zwei Dritteln der Fälle genau ist, wie in mehreren Studien gezeigt wurde. Daher werden Röntgenaufnahmen nicht als alleinige Beurteilungsebene des Vorhandenseins eines erfolgreichen Eingriffs nach einer lumbalen Fusionsoperation bei degenerativen Erkrankungen empfohlen (Choudhri et al., 2014).

7.6 Ausblick: Klinische Anwendung und Relevanz der Ergebnisse

Diese Ergebnisse implizieren Variationen für die klinische Anwendung, insbesondere in der chirurgischen Entscheidungsfindung, da sich eine vorbeugende Maßnahme für Schmerzen im Iliosakralgelenk nach mehrsegmentalen Spondylodesen empfiehlt.

Zum einen können sie den Chirurg:innen bei der Operationsplanung helfen, indem sie eine sakropelvine Fixierung mit S2Al-Schrauben als vorbeugende Maßnahme in Betracht ziehen, wenn ein hohes Risiko für das Auftreten

postoperativer Schmerzen des Iliosakralgelenks besteht. Dies kann die Berücksichtigung von Faktoren wie dem Alter der Patient:innen, Vorerkrankungen und anderen Risikofaktoren beinhalten.

Zum anderen muss in Einzelfällen auch intraoperativ die Wahl getroffen werden auf Grundlage der individuellen Bedürfnisse und Risikofaktoren der Patient:innen. Hier sollten die Anzahl der an der Fusion beteiligten Wirbelsäulensegmente, die Art der verwendeten Hardware und andere chirurgische Faktoren beachtet werden, die das Risiko der Entwicklung von Iliosakralgelenkschmerzen beeinflussen können.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass durch die Identifizierung von Patient:innen, bei denen ein hohes Risiko für die Entwicklung von Iliosakralgelenkschmerzen besteht, Operierende eine gezieltere und individuellere postoperative Versorgung leisten sollten, um die Patient:innenzufriedenheit zu verbessern und die Gesamtlast der postoperativen Versorgung zu verringern.

Schließlich kommt auch eine Hinterfragung der TLIF als der am häufigsten angewendeten Operationstechnik, die auch dem Standard an der Orthopädischen Universitätsklinik Tübingen entspricht, in Betracht: Den zahlreichen Vorteilen verdankt diese Methode ihren Stellenwert, allerdings müssen einige Einschränkungen beachtet werden. Der dorsale Zugang geht im Vergleich zu ventralen oder lateralen Zugängen mit einer Schädigung der paravertebralen Muskulatur einher, die insbesondere bei Patient:innen mit weniger ausgeprägter Muskulatur aufgrund ihres Alters oder ihrer Vorerkrankungen zu einer prolongierten Erholungsphase des Gewebes führen kann. Die Metaanalyse von Zhai et al. bezüglich multisegmentaler lumbaler Fusion stellte zudem eine Überlegenheit von minimalinvasiver TLIF zu offenchirurgischer TLIF in Bezug auf Blutverlust, kürzerem Klinikaufenthalt und verbesserten postoperativen Symptomen, im Sinne eines niedrigeren Wertes auf der VAS fest (Zhai et al., 2024). Hervorzuheben ist jedoch ein Mangel an Untersuchungen zu funktionellen Ergebnissen nach multisegmentalen lumbalen Fusionsoperationen, speziell über mindestens drei Segmente. Hier sind weitere Studien zur Beurteilung notwendig.

Auch der Aspekt der potenziellen Kosteneffizienz durch die Verwendung von S2AI-Schrauben als Präventivmaßnahme lohnt ein Nachdenken: Mehrere Faktoren spielen eine Rolle, darunter die Kosten der Hardware, die Kosten des komplexeren und zeitaufwändigeren chirurgischen Eingriffs und der postoperativen Versorgung, die gegen die potenziellen Kosteneinsparungen durch Vorbeugung von postoperativ auftretenden und behandlungsbedürftig werdenden Iliosakralgelenkschmerzen abzuwägen sind. Patient:innen, die nach einer Wirbelsäulenfusion Schmerzen im Iliosakralgelenk entwickeln, benötigen möglicherweise zusätzliche medizinische Versorgung, wie z. B. Physiotherapie, Medikamente oder sogar eine Revisionsoperation. Die Kosten für diese zusätzlichen Eingriffe können erheblich sein und letztendlich die Kosten einer Fixation mit Iliumschrauben übersteigen. Darüber hinaus kann diese zusätzliche Verschraubung Schmerzen im Iliosakralgelenk verhindern und die Notwendigkeit zusätzlicher medizinischer Eingriffe reduzieren, was auch zu besseren Behandlungsergebnissen und einer Steigerung der Lebensqualität für die Patient:innen führen kann. Dies kann auch zu zusätzlichen volkswirtschaftlichen Vorteilen führen, wie z. B. weniger Fehlzeiten am Arbeitsplatz und eine verbesserte Produktivität.

Eine zu erwägende Ergänzung der analgetischen Maßnahmen untersuchte eine prospektive Studie zu Schmerzen im Iliosakralgelenk nach Operationen zur Behandlung von Wirbelsäulendeformitäten mit S2AI-Schrauben und Linderung dieser mittels ultraschallgeführter Blockade des Iliosakralgelenks. Es wurde festgestellt, dass 12 % der Patient:innen nach der Operation Schmerzen im Iliosakralgelenk hatten. Diese früh auftretenden Schmerzen konnten durch eine ultraschallgestützte Blockade des Iliosakralgelenks gelindert werden, was für die Diagnose und das Schmerzmanagement von klinischer Bedeutung ist, auch um eine Physiotherapie zu ermöglichen (Murata et al., 2022).

Letztendlich hängt die Kosteneffektivität einer Spondylodese mit S2AI-Schrauben als Präventivmaßnahme für Iliosakralgelenkschmerzen vom spezifischen Kontext ab, in dem die Operation durchgeführt wird, einschließlich der Patient:innenpopulation, des lokalen Gesundheitssystems und der Gesamtkosten der medizinischen Versorgung in der Region. Eine formelle Kosten-Nutzen-Analyse

wäre erforderlich, um die wirtschaftlichen Auswirkungen dieser vorbeugenden Maßnahme vollständig zu bewerten.

8 Schlussfolgerung

Die hier gefundenen Forschungsergebnisse zeigen, dass mit S2AI-Schrauben Chirurg:innen ein potenziell wertvolles Instrument zur Verbesserung der Behandlung zur Verfügung steht. Eine spürbare Verringerung von ISG-Schmerzen nach einer Wirbelsäulenversteifungsoperation wirkt sich in erheblicher Weise auf das Leben der Patient:innen aus.

Einschränkend ist jedoch darauf hinzuweisen, dass der ODI, der Schmerzsymptomatik im Bereich des Rückens allgemein untersucht, eine Präferenzierung der S2AI-Schrauben nicht rechtfertigt. Die hier untersuchte Vorgehensweise kann also als Alternative im Hinblick auf die Chance zur Minderung der Schmerzen des Iliosakralgelenks angewandt werden, ohne sich als anderen Methoden grundsätzlich überlegen erwiesen zu haben. Hierzu ist auf die keine signifikanten Unterschiede liefernden Auswertungen der RMS, VAS nachts und in Ruhe und den Gegenteiligen, nämlich eine geringere Schmerzsymptomatik bei Belastungen, nahelegenden VAS bei Belastung zu verweisen.

9 Zusammenfassung

Das Thema der vorliegenden Studie, „Unterscheidet sich der untere Rückenschmerz bei Patient:innen mit S2AI-Schrauben im Vergleich zu Patient:innen ohne Ilioschrauben nach langstreckigen dorsalen Spondylodesen ≥ 3 Segmente?“, ist ergebnisoffen formuliert und soll sich vornehmlich der Untersuchung von Schmerzen des Iliosakralgelenks nach lumbaler Fusion widmen.

Es wurden 14 Patient:innen ohne sakropelvine Fixierung (Gruppe 1) und 16 Patient:innen mit S2AI-Schrauben (Gruppe 2) verglichen, die sich zwischen 2014 und 2021 einer transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) über mindestens 3 Segmente, beginnend ab L5/S1 unterzogen hatten. Postoperative radiologische Parameter (lumbaler Lordosewinkel, pelvic tilt, pelvic incidence) sowie klinische Untersuchungsergebnisse und funktionelle Erhebungen mittels Fragebögen

(Roland-Morris Score, Oswestry Disability Index, visuelle Analogskala) und des Scoring Systems for Sacroiliac Joint Pain wurden ausgewertet.

In Auswertung der Ergebnisse und unter Einschluss einer Bewertung der Operationsmethodik kommt die Studie unter Berücksichtigung und Auseinandersetzung mit der einschlägigen Fachliteratur zu dem Ergebnis, dass Unterschiede im Sinne der Ausgangsfrage für den untersuchten Teilbereich, Schmerzsymptomatik bei Belastungen, in signifikanter Weise vorliegen, sowie eine Überlegenheit der Gruppe mit S2AI-Schrauben bei Iliosakralgelenksschmerzen in Form eines statistisch signifikanten Ergebnisses gezeigt werden konnten. Als eine grundsätzlich überlegene Operationsmethode kann die Anwendung von S2AI-Schrauben jedoch mangels weiterer signifikanter Ergebnisse nicht bezeichnet werden. Die Anwendung von Iliumschrauben steht somit als Alternative zu anderen Methoden zur Verfügung und kann mit Blick auf die hier ermittelten Ergebnisse als chancenerhöhend zur dauerhaften Minderung der Schmerzen des Iliosakralgelenks betrachtet werden.

Diese Ergebnisse tragen zur wachsenden Evidenz bei, die die Wirksamkeit der sakropelvinen Fixierung bei der Verbesserung der Patient:innenergebnisse unterstützt.

10 Literaturverzeichnis

- AOK, W. I. d. (2023). Gesundheitsatlas Deutschland. *Rückenschmerzen Verbreitung in der Bevölkerung Deutschlands Ursachen, Folgen und Präventionsmöglichkeiten*. doi:10.4126/FRL01-006453981
- Aranke, M., McCrudy, G., Rooney, K., Patel, K., Lee, C. A., Hasoon, J., & Kaye, A. D. (2022). Minimally Invasive and Conservative Interventions for the Treatment of Sacroiliac Joint Pain: A Review of Recent Literature. *Orthop Rev (Pavia)*, *14*(4), 34098. doi:10.52965/001c.34098
- Baber, Z., & Erdek, M. A. (2016). Failed back surgery syndrome: current perspectives. *J Pain Res*, *9*, 979-987. doi:10.2147/jpr.S92776
- Bredow, J., Meyer, C., Oikonomidis, S., Kernich, C., Kernich, N., Hofstetter, C. P., . . . Prasse, T. (2022). Long-term Radiological and Clinical Outcome after Lumbar Spinal Fusion Surgery in Patients with Degenerative Spondylolisthesis: A Prospective 6-Year Follow-up Study. *Orthop Surg*, *14*(8), 1607-1614. doi:10.1111/os.13350
- Buckup, J., Hoffmann, R., & Goetz, F. H., Simon Martin; Malzkorn, Rene; Plaaß, Christian; Schmidt-Horlohé, Kay; Stukenborg-Colsman, Christina; Thorey, Fritz. (2019). *Klinische Tests an Knochen, Gelenken und Muskeln* (Vol. 6). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- Bundesärztekammer (BÄK), K. r. B. K., Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). (2017). Nationale VersorgungsLeitlinie Nicht-spezifischer Kreuzschmerz – Langfassung. 2. Auflage (Version 1). doi:10.6101/AZQ/000353
- Casser, H. R., Seddigh, S., & Rauschmann, M. (2016). Acute Lumbar Back Pain. *Dtsch Arztebl Int*, *113*(13), 223-234. doi:10.3238/arztebl.2016.0223
- Cecchinato, R., Redaelli, A., Martini, C., Morselli, C., Villafañe, J. H., Lamartina, C., & Berjano, P. (2017). Long fusions to S1 with or without pelvic fixation can induce relevant acute variations in pelvic incidence: a retrospective cohort study of adult spine deformity surgery. *European Spine Journal*, *26*(4), 436-441. doi:10.1007/s00586-017-5154-z
- Chan, C. W., & Peng, P. (2011). Failed back surgery syndrome. *Pain Med*, *12*(4), 577-606. doi:10.1111/j.1526-4637.2011.01089.x
- Chapman, J. R., Norvell, D. C., Hermsmeyer, J. T., Bransford, R. J., DeVine, J., McGirt, M. J., & Lee, M. J. (2011). Evaluating common outcomes for measuring treatment

success for chronic low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)*, 36(21 Suppl), S54-68. doi:10.1097/BRS.0b013e31822ef74d

- Chenot, J.-F., Greitemann, B., Kladny, B., Petzke, F., Pfingsten, M., & Schorr, S. G. (2017). Nichtspezifischer Kreuzschmerz. *Dtsch Arztebl International*, 114(51-52), 883-890. Retrieved from <https://www.aerzteblatt.de/int/article.asp?id=195478>
- Cher, D., Polly, D., & Berven, S. (2014). Sacroiliac joint pain: burden of disease. *Med Devices (Auckl)*, 7, 73-81. doi:10.2147/mder.S59437
- Cheung, J. P. Y. (2020). The importance of sagittal balance in adult scoliosis surgery. *Ann Transl Med*, 8(2), 35. doi:10.21037/atm.2019.10.19
- Chiarotto, A., Boers, M., Deyo, R. A., Buchbinder, R., Corbin, T. P., Costa, L. O. P., . . . Ostelo, R. W. (2018). Core outcome measurement instruments for clinical trials in nonspecific low back pain. *Pain*, 159(3), 481-495. doi:10.1097/j.pain.0000000000001117
- Choudhri, T. F., Mummaneni, P. V., Dhall, S. S., Eck, J. C., Groff, M. W., Ghogawala, Z., . . . Kaiser, M. G. (2014). Guideline update for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 4: Radiographic assessment of fusion status. *Journal of Neurosurgery: Spine SPI*, 21(1), 23. doi:10.3171/2014.4.Spine14267
- Christelis, N., Simpson, B., Russo, M., Stanton-Hicks, M., Barolat, G., Thomson, S., . . . Loeser, J. (2021). Persistent Spinal Pain Syndrome: A Proposal for Failed Back Surgery Syndrome and ICD-11. *Pain Medicine*, 22(4), 807-818. doi:10.1093/pm/pnab015
- Cohen, S. P. (2005). Sacroiliac Joint Pain: A Comprehensive Review of Anatomy, Diagnosis, and Treatment. *Anesthesia & Analgesia*, 101(5), 1440-1453. doi:10.1213/01.Ane.0000180831.60169.Ea
- Cunningham, B. W., Seftor, J. C., Hu, N., Kim, S. W., Bridwell, K. H., & McAfee, P. C. (2010). Biomechanical Comparison of Iliac Screws Versus Interbody Femoral Ring Allograft on Lumbosacral Kinematics and Sacral Screw Strain. *Spine*, 35(6), E198-E205. doi:10.1097/BRS.0b013e3181c142bf
- da Silva, T., Mills, K., Brown, B. T., Pocovi, N., de Campos, T., Maher, C., & Hancock, M. J. (2019). Recurrence of low back pain is common: a prospective inception cohort study. *J Physiother*, 65(3), 159-165. doi:10.1016/j.jphys.2019.04.010
- De la Garza Ramos, R., Nakhla, J., Sciubba, D. M., & Yassari, R. (2019). Iliac screw versus S2 alar-iliac screw fixation in adults: a meta-analysis. *Journal of Neurosurgery: Spine SPI*, 30(2), 253-258. doi:10.3171/2018.7.Spine18710

- Elder, B. D., Ishida, W., Lo, S.-F. L., Holmes, C., Goodwin, C. R., Kosztowski, T. A., . . . Witham, T. F. (2017). Use of S2-Alar-iliac Screws Associated With Less Complications Than Iliac Screws in Adult Lumbosacropelvic Fixation. *Spine*, 42(3), E142-E149. doi:10.1097/brs.0000000000001722
- Elsamadicy, A. A., Farber, S. H., Yang, S., Hussaini, S. M. Q., Murphy, K. R., Sergesketter, A., . . . Lad, S. P. (2017). Impact of Insurance Provider on Overall Costs in Failed Back Surgery Syndrome: A Cost Study of 122,827 Patients. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, 20(4), 354-360. doi:<https://doi.org/10.1111/ner.12584>
- Eun, I. S., Son, S. M., Goh, T. S., & Lee, J. S. (2020). Sagittal spinopelvic alignment after spinal fusion in degenerative lumbar scoliosis: a meta-analysis. *Br J Neurosurg*, 34(2), 176-180. doi:10.1080/02688697.2020.1725437
- Fairbank, J. C. T., & Pynsent, P. B. (2000). The Oswestry Disability Index. *Spine*, 25(22), 2940-2953. Retrieved from https://journals.lww.com/spinejournal/Fulltext/2000/11150/The_Oswestry_Disability_Index.17.aspx
- Finger, T., Bayerl, S., Bertog, M., Czabanka, M., Woitzik, J., & Vajkoczy, P. (2016). Impact of sacropelvic fixation on the development of postoperative sacroiliac joint pain following multilevel stabilization for degenerative spine disease. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 150, 18-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2016.08.009>
- Finger, T., Bayerl, S., Onken, J., Czabanka, M., Woitzik, J., & Vajkoczy, P. (2014). Sacropelvic fixation versus fusion to the sacrum for spondylodesis in multilevel degenerative spine disease. *Eur Spine J*, 23(5), 1013-1020. doi:10.1007/s00586-014-3165-6
- Fleege, C., Rickert, M., & Rauschmann, M. (2015). PLIF- und TLIF-Verfahren. *Der Orthopäde*, 44(2), 114-123. doi:10.1007/s00132-014-3065-9
- Frey, D., Rieger, S., Diehl, E., & Pinzon, L. C. E. (2018). [Factors Influencing Chronic Back Pain in Care Workers Attending to The Elderly in Germany]. *Gesundheitswesen*, 80(2), 172-175. doi:10.1055/s-0043-104693
- Frymoyer, J. W., Howe, J., & Kuhlmann, D. (1978). The long-term effects of spinal fusion on the sacroiliac joints and ilium. *Clin Orthop Relat Res*(134), 196-201.
- Gao, Z., Sun, X., Chen, C., Teng, Z., Xu, B., Ma, X., . . . Yang, Q. (2021). Comparative radiological outcomes and complications of sacral-2-alar iliac screw versus iliac screw for sacropelvic fixation. *European Spine Journal*, 30. doi:10.1007/s00586-021-06864-7

- Gerlach, F. W., E. (2018). *Bedarfsgerechte Steuerung der Gesundheitsversorgung*. Retrieved from https://www.svr-gesundheit.de/fileadmin/Gutachten/Gutachten_2018/Gutachten_2018.pdf
- Glassman, S. D., Carreon, L. Y., Dimar, J. R., Campbell, M. J., Puno, R. M., & Johnson, J. R. (2007). Clinical outcomes in older patients after posterolateral lumbar fusion. *Spine J*, 7(5), 547-551. doi:10.1016/j.spinee.2006.11.003
- Ha, A. S., Hong, D. Y., Luzzi, A. J., Coury, J. R., Cerpa, M., Sardar, Z., & Lenke, L. G. (2022). Minimum 2-Year Analysis of S2-Alar-Iliac Screw Fixation for Adult Spinal Deformity. *Global Spine J*, 12(8), 1640-1646. doi:10.1177/2192568220984478
- Ha, K.-Y., Lee, J.-S., & Kim, K.-W. (2008). Degeneration of Sacroiliac Joint After Instrumented Lumbar or Lumbosacral Fusion: A Prospective Cohort Study Over Five-Year Follow-up. *Spine*, 33(11), 1192-1198. doi:10.1097/BRS.0b013e318170fd35
- Hackenberg, L., Halm, H., Bullmann, V., Vieth, V., Schneider, M., & Liljenqvist, U. (2005). Transforaminal lumbar interbody fusion: a safe technique with satisfactory three to five year results. *Eur Spine J*, 14(6), 551-558. doi:10.1007/s00586-004-0830-1
- Han, B., Yin, P., Hai, Y., Cheng, Y., Guan, L., & Liu, Y. (2021). The Comparison of Spinopelvic Parameters, Complications, and Clinical Outcomes After Spinal Fusion to S1 with or without Additional Sacropelvic Fixation for Adult Spinal Deformity: A Systematic Review and Meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 46(17), E945-e953. doi:10.1097/brs.0000000000004003
- Harms, J., & Rolinger, H. (1982). Die operative Behandlung der Spondylolisthese durch dorsale Aufrichtung und ventrale Verblockung. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete*, 120(03), 343-347.
- Heemskerk, J. L., Oluwadara Akinduro, O., Clifton, W., Quiñones-Hinojosa, A., & Abode-lyamah, K. O. (2021). Long-term clinical outcome of minimally invasive versus open single-level transforaminal lumbar interbody fusion for degenerative lumbar diseases: a meta-analysis. *Spine J*, 21(12), 2049-2065. doi:10.1016/j.spinee.2021.07.006
- Hoernschemeyer, D. G., Pashuck, T. D., & Pfeiffer, F. M. (2017). Analysis of the s2 alar-iliac screw as compared with the traditional iliac screw: does it increase stability with sacroiliac fixation of the spine? *The Spine Journal*, 17(6), 875-879. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spinee.2017.02.001>
- Hoffmann, C.-H., & Kandziora, F. (2020). Minimal-invasive transforaminale lumbale interkorporelle Fusion. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 32(3), 180-191. doi:10.1007/s00064-020-00660-0

- Hyun, S. J., Rhim, S. C., Kim, Y. J., & Kim, Y. B. (2010). A mid-term follow-up result of spinopelvic fixation using iliac screws for lumbosacral fusion. *J Korean Neurosurg Soc*, 48(4), 347-353. doi:10.3340/jkns.2010.48.4.347
- Ilyas, H., Place, H., & Puryear, A. (2015). A Comparison of Early Clinical and Radiographic Complications of Iliac Screw Fixation Versus S2 Alar Iliac (S2AI) Fixation in the Adult and Pediatric Populations. *J Spinal Disord Tech*, 28(4), E199-205. doi:10.1097/bsd.0000000000000222
- Iohom, G. (2006). Chapter 11 - Clinical Assessment of Postoperative Pain. In G. Shorten, D. B. Carr, D. Harmon, M. M. Puig, & J. Browne (Eds.), *Postoperative Pain Management* (pp. 102-108). Philadelphia: W.B. Saunders.
- Ishida, W., Elder, B. D., Holmes, C., Lo, S. L., Goodwin, C. R., Kosztowski, T. A., . . . Witham, T. F. (2017). Comparison Between S2-Alar-Iliac Screw Fixation and Iliac Screw Fixation in Adult Deformity Surgery: Reoperation Rates and Spinopelvic Parameters. *Global Spine J*, 7(7), 672-680. doi:10.1177/2192568217700111
- Ivanov, A. A., Kiapour, A., Ebraheim, N. A., & Goel, V. (2009). Lumbar Fusion Leads to Increases in Angular Motion and Stress Across Sacroiliac Joint: A Finite Element Study. *Spine*, 34(5), E162-E169. doi:10.1097/BRS.0b013e3181978ea3
- Janka, M., Merkel, A., & Schuh, A. (2019). Diagnostik an der Lendenwirbelsäule. *MMW - Fortschritte der Medizin*, 161(1), 55-58. doi:10.1007/s15006-019-0069-8
- Junge, A., & Mannion, A. F. (2004). Fragebögen für Patienten mit Rückenschmerzen. *Der Orthopäde*, 33(5), 545-552. doi:10.1007/s00132-003-0613-0
- Kalidindi, K. K. V., Bansal, K., Vishwakarma, G., & Chhabra, H. S. (2021). New Onset Sacroiliac Joint Pain After Transforaminal Interbody Fusion: What Are the Culprits? *Global Spine J*, 21925682211003852. doi:10.1177/21925682211003852
- Katz, V., Schofferman, J., & Reynolds, J. (2003). The sacroiliac joint: a potential cause of pain after lumbar fusion to the sacrum. *J Spinal Disord Tech*, 16(1), 96-99. doi:10.1097/00024720-200302000-00015
- Kersten, R., Öner, F. C., Arts, M. P., Mitroiu, M., Roes, K. C. B., de Gast, A., & van Gaalen, S. M. (2022). The SNAP Trial: 2-Year Results of a Double-Blind Multicenter Randomized Controlled Trial of a Silicon Nitride Versus a PEEK Cage in Patients After Lumbar Fusion Surgery. *Global Spine J*, 12(8), 1687-1695. doi:10.1177/2192568220985472
- Koller, H., Zenner, J., Hempfing, A., Ferraris, L., & Meier, O. (2013). Reinforcement of lumbosacral instrumentation using S1-pedicle screws combined with S2-alar screws. *Oper Orthop Traumatol*, 25(3), 294-314. doi:10.1007/s00064-012-0160-0

- Konrads, C., & Raab, P. (2018). Brust- und Lendenwirbelsäule. In C. Konrads & M. Rudert (Eds.), *Klinische Tests und Untersuchung in Orthopädie und Unfallchirurgie* (pp. 143-174). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kortmann, H. R., Wolter, D., Reckert, L., & Jürgens, C. (1987). *The Rotational Stiffness of the Lumbar Spine Following Various Transpedicular Osteosyntheses*, Berlin, Heidelberg.
- Kostev, K. (2019). Real-world prevalence and incidence of lower back pain in Germany. *Rheumatol Int*, 39(6), 1113. doi:10.1007/s00296-019-04295-8
- Krieg, S. M., Sollmann, N., Ille, S., Albers, L., & Meyer, B. (2021). Revision by S2-alar-iliac instrumentation reduces caudal screw loosening while improving sacroiliac joint pain—a group comparison study. *Neurosurgical Review*, 44(4), 2145-2151. doi:10.1007/s10143-020-01377-1
- Kroppenstedt S, H. A. (2018). Spezifischer Kreuzschmerz. *AWMF online*. Retrieved from https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-051l_S2k_Spezifischer_Kreuzschmerz_2018-02.pdf
- Kunze, B., Drasseck, T., & Kluba, T. (2011). Posteriore und transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (PLIF/TLIF) zur Therapie des lokalisierten Segmentaufbrauchs der LWS. [Posterior and Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (PLIF/TLIF) for the Treatment of Localised Segment Degeneration of Lumbar Spine]. *Z Orthop Unfall*, 149(03), 312-316. doi:10.1055/s-0030-1250689
- Kurosawa, D., & Murakami, E. (2012). Pelvic girdle tenderness points to differentiate the sacroiliac joint dysfunction from lumbar diseases. *Seikeigeka*, 63, 1231-1235.
- Kurosawa, D., Murakami, E., Ozawa, H., Koga, H., Isu, T., Chiba, Y., . . . Yamaguchi, T. (2017). A Diagnostic Scoring System for Sacroiliac Joint Pain Originating from the Posterior Ligament. *Pain Med*, 18(2), 228-238. doi:10.1093/pm/pnw117
- Lattig, F., & Weckbach, S. (2017). S2-Ala-Iliumschrauben zur erweiterten pelvinen Fixation mehrsegmentaler lumbaler Spondylodesen. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 29(4), 360-372. doi:10.1007/s00064-017-0508-6
- Latza, U., Kohlmann, T., Deck, R., & Raspe, H. (2000). Influence of occupational factors on the relation between socioeconomic status and self-reported back pain in a population-based sample of German adults with back pain. *Spine (Phila Pa 1976)*, 25(11), 1390-1397. doi:10.1097/00007632-200006010-00011
- Lazaridou, A., Elbaridi, N., Edwards, R. R., & Berde, C. B. (2018). Chapter 5 - Pain Assessment. In H. T. Benzon, S. N. Raja, S. S. Liu, S. M. Fishman, & S. P. Cohen (Eds.), *Essentials of Pain Medicine (Fourth Edition)* (pp. 39-46.e31): Elsevier.

- Le Huec, J.-C., Faundez, A., Dominguez, D., Hoffmeyer, P., & Aunoble, S. (2015). Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review. *International Orthopaedics*, 39(1), 87-95. doi:10.1007/s00264-014-2516-6
- Le Huec, J. C., Thompson, W., Mohsinaly, Y., Barrey, C., & Faundez, A. (2019). Sagittal balance of the spine. *Eur Spine J*, 28(9), 1889-1905. doi:10.1007/s00586-019-06083-1
- Lee, J. H., Na, K. H., Kim, J. H., Jeong, H. Y., & Chang, D. G. (2016). Is pelvic incidence a constant, as everyone knows? Changes of pelvic incidence in surgically corrected adult sagittal deformity. *Eur Spine J*, 25(11), 3707-3714. doi:10.1007/s00586-015-4199-0
- Lee, N. J., Cerpa, M., Leung, E., Sardar, Z. M., Lehman, R. A., & Lenke, L. G. (2021). Do readmissions and reoperations adversely affect patient-reported outcomes following complex adult spinal deformity surgery at a minimum 2 years postoperative? *Spine Deformity*, 9(3), 789-801. doi:10.1007/s43390-020-00235-w
- Lee, Y. C., Lee, R., & Harman, C. (2019). The incidence of new onset sacroiliac joint pain following lumbar fusion. *J Spine Surg*, 5(3), 310-314. doi:10.21037/jss.2019.09.05
- Legaye, J., Duval-Beaupère, G., Hecquet, J., & Marty, C. (1998). Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J*, 7(2), 99-103. doi:10.1007/s005860050038
- Luo, Q., Kim, Y.-C., Kim, K.-T., Ha, K.-Y., Ahn, J., Kim, S.-M., & Kim, M.-G. (2021). Use of iliac screw associated with more correction of lumbar lordosis than S2-alar-iliac screw for adult spinal deformity. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 22(1), 676. doi:10.1186/s12891-021-04568-z
- Madert, J., Liem, M., Frosch, K.-H., & Niemeyer, T. (2013). Dorsolateraler Zugang und interkorporelle Spondylodese bei Spondylodiszitis der Brust-und Lendenwirbelsäule (TLIF-Technik). *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 25(3), 262-272.
- Manzetti, M., Ruffilli, A., Fiore, M., Barile, F., Viroli, G., Cappello, L., & Faldini, C. (2022). Sacroiliac Joint Degeneration and Pain After Spinal Arthrodesis. *Clinical Spine Surgery*, 35. doi:10.1097/BSD.0000000000001341
- Mobbs, R. J., Phan, K., Malham, G., Seex, K., & Rao, P. J. (2015). Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *J Spine Surg*, 1(1), 2-18. doi:10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05

- Moser, M., Okano, I., Albertini Sanchez, L., Salzmann, S. N., Carlson, B. B., Adl Amini, D., . . . Hughes, A. P. (2022). Preoperative Association Between Quantitative Lumbar Muscle Parameters and Spinal Sagittal Alignment in Lumbar Fusion Patients. *Spine (Phila Pa 1976)*, *47*(23), 1675-1686. doi:10.1097/brs.0000000000004410
- Murata, S., Iwasaki, H., Takami, M., Nagata, K., Hashizume, H., Tsutsui, S., . . . Yamada, H. (2022). Sacroiliac Joint Pain Should Be Suspected in Early Buttock and Groin Pain after Adult Spinal Deformity Surgery: An Observational Study. *Spine Surg Relat Res*, *6*(5), 472-479. doi:10.22603/ssrr.2021-0196
- Onsel, C., Collier, B. D., Kir, K. M., Larson, S. J., Meyer, G. A., Krasnow, A. Z., . . . Carrera, G. F. (1992). Increased sacroiliac joint uptake after lumbar fusion and/or laminectomy. *Clin Nucl Med*, *17*(4), 283-287. doi:10.1097/00003072-199204000-00004
- Paternostro-Sluga, T., Grim-Stieger, M., Posch, M., Schuhfried, O., Vacariu, G., Mittermaier, C., . . . Fialka-Moser, V. (2008). Reliability and validity of the Medical Research Council (MRC) scale and a modified scale for testing muscle strength in patients with radial palsy. *J Rehabil Med*, *40*(8), 665-671. doi:10.2340/16501977-0235
- Pumberger, M. (2018). *Patienten- und operationsspezifische Komplikationsanalyse dorsaler Spondylodesen bei degenerativen Lendenwirbelsäulenerkrankungen*: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- Rashbaum, R. F., Ohnmeiss, D. D., Lindley, E. M., Kitchel, S. H., & Patel, V. V. (2016). Sacroiliac Joint Pain and Its Treatment. *Clinical Spine Surgery*, *29*(2), 42-48. doi:10.1097/bsd.0000000000000359
- Rentenzugänge wegen verminderter Erwerbsfähigkeit in der Gesetzlichen Rentenversicherung im Laufe des Berichtsjahres.* (2015).
- Robert-Koch-Institut. (2012). Rückenschmerzen. *Gesundheitsberichterstattung des Bundes, Heft 53*.
- Robert-Koch-Institut. (2015). Gesundheit in Deutschland. *Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Gemeinsam getragen von RKI und Destatis*.
- Rompe, J. D., Eysel, P., Hopf, C., & Heine, J. (1995). [Transpedicular lumbar spondylodesis in elderly patients]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, *133*(3), 249-255. doi:10.1055/s-2008-1039445
- Schnake, K. J., Rappert, D., Storzer, B., Schreyer, S., Hilber, F., & Mehren, C. (2019). Lumbale Spondylodese – Indikationen und Techniken. *Der Orthopäde*, *48*(1), 50-58. doi:10.1007/s00132-018-03670-w

- Schneider, M. (2021). Das schmerzhaftes Iliosakralgelenk. *Schmerzmedizin*, 37(4), 31-35. doi:10.1007/s00940-021-3134-1
- Shen, J., Boudier-Reveret, M., Majdalani, C., Truong, V. T., Shedid, D., Boubez, G., . . . Wang, Z. (2023). Incidence of sacroiliac joint pain after lumbosacral spine fusion: A systematic review. *Neurochirurgie*, 69(2), 101419. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2023.101419>
- Siegrist, P. D. J. (2012). *Gratifikationskrisen am Arbeitsplatz und ihre Folgen*. Retrieved from <https://www.dgsf.org/ueber-uns/gruppen/fachgruppen/fachgruppe-humane-arbeit-und-burnout-praevention/Burnout%20-%20Der%20Preis%20fuer%20die%20Leistungsgesellschaft%20-%20Prof.%20Siegrist.pdf>
- Simmel, S., Settner, M., Schmidt, J., & Ernst, U. (2017). Neutral-0-Methode. *Trauma und Berufskrankheit*, 19(3), 170-174. doi:10.1007/s10039-017-0290-6
- Srinivasalu, S., Modi, H. N., Smehta, S., Suh, S.-W., Chen, T., & Murun, T. (2008). Cobb angle measurement of scoliosis using computer measurement of digitally acquired radiographs-intraobserver and interobserver variability. *Asian spine journal*, 2(2), 90-93. doi:10.4184/asj.2008.2.2.90
- Steffens, D., Maher, C. G., Pereira, L. S., Stevens, M. L., Oliveira, V. C., Chapple, M., . . . Hancock, M. J. (2016). Prevention of Low Back Pain: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Intern Med*, 176(2), 199-208. doi:10.1001/jamainternmed.2015.7431
- Stratford, P. W., & Riddle, D. L. (2016). A Roland Morris Disability Questionnaire Target Value to Distinguish between Functional and Dysfunctional States in People with Low Back Pain. *Physiother Can*, 68(1), 29-35. doi:10.3138/ptc.2014-85
- Suh, J. H., Kim, H., Jung, G. P., Ko, J. Y., & Ryu, J. S. (2019). The effect of lumbar stabilization and walking exercises on chronic low back pain: A randomized controlled trial. *Medicine (Baltimore)*, 98(26), e16173. doi:10.1097/md.00000000000016173
- T-PAL. Transforaminales Posteriores Atraumatisches Lumbales Cagesystem*. (2012). Retrieved from www.synthes.com/lit: www.synthes.com/lit
- Tis, J. E., Helgeson, M., Lehman, R. A., & Dmitriev, A. E. (2009). A biomechanical comparison of different types of lumbopelvic fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*, 34(24), E866-872. doi:10.1097/BRS.0b013e3181bf94f0
- Tonosu, J., Kurosawa, D., Nishi, T., Ito, K., Morimoto, D., Musha, Y., . . . Murakami, E. (2019). The association between sacroiliac joint-related pain following lumbar spine surgery and spinopelvic parameters: a prospective multicenter study. *European Spine Journal*, 28(7), 1603-1609. doi:10.1007/s00586-019-05952-z

- Tonosu, J., Oka, H., Watanabe, K., Abe, H., Higashikawa, A., Yamada, K., . . . Matsudaira, K. (2018). Validation study of a diagnostic scoring system for sacroiliac joint-related pain. *J Pain Res*, *11*, 1659-1663. doi:10.2147/jpr.S167033
- Traeger, A. C., Buchbinder, R., Elshaug, A. G., Croft, P. R., & Maher, C. G. (2019). Care for low back pain: can health systems deliver? *Bull World Health Organ*, *97*(6), 423-433. doi:10.2471/blt.18.226050
- Ulrich, C. T., Schär, R. T., Jesse, C. M., Fichtner, J., Raabe, A., Payer, M., . . . Hausmann, O. N. (2021). *Sagittale Balance und Haltungsinstabilität als Kriterien für Wirbelsäulenoperationen*. Paper presented at the Swiss medical forum.
- Unoki, E., Abe, E., Murai, H., Kobayashi, T., & Abe, T. (2016). Fusion of Multiple Segments Can Increase the Incidence of Sacroiliac Joint Pain After Lumbar or Lumbosacral Fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*, *41*(12), 999-1005. doi:10.1097/brs.0000000000001409
- Unoki, E., Miyakoshi, N., Abe, E., Kobayashi, T., Abe, T., Kudo, D., & Shimada, Y. (2019). Sacropelvic Fixation With S2 Alar Iliac Screws May Prevent Sacroiliac Joint Pain After Multisegment Spinal Fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*, *44*(17), E1024-e1030. doi:10.1097/brs.0000000000003041
- Vajkoczy, P. (2019). Einsatz der spinalen Navigation in der Wirbelsäulen Chirurgie. *Die Wirbelsäule*, *03*(01), 17-20. doi:10.1055/a-0723-3146
- Vialle, R., Levassor, N., Rillardon, L., Templier, A., Skalli, W., & Guigui, P. (2005). Radiographic Analysis of the Sagittal Alignment and Balance of the Spine in Asymptomatic Subjects. *JBJS*, *87*(2), 260-267. doi:10.2106/jbjs.D.02043
- Vleeming, A., Schuenke, M. D., Masi, A. T., Carreiro, J. E., Danneels, L., & Willard, F. H. (2012). The sacroiliac joint: an overview of its anatomy, function and potential clinical implications. *J Anat*, *221*(6), 537-567. doi:10.1111/j.1469-7580.2012.01564.x
- vonderHoeh, N. H., Voelker, A., & Heyde, C. E. (2017). Results of lumbar spondylodeses using different bone grafting materials after transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF). *Eur Spine J*, *26*(11), 2835-2842. doi:10.1007/s00586-017-5145-0
- 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. *Orthop Surg*, *13*(3), 863-875. doi:10.1111/os.12872
- Walter, T. (2013). Finger-Boden-Abstand: Prognose beim Rückenschmerz. *Journal Club Schmerzmedizin*, *2*(01), 22-23. doi:10.1055/s-0033-1343852

- Weir, S., Samnaliev, M., Kuo, T. C., Ni Choitir, C., Tierney, T. S., Cumming, D., . . . Eldabe, S. (2017). The incidence and healthcare costs of persistent postoperative pain following lumbar spine surgery in the UK: a cohort study using the Clinical Practice Research Datalink (CPRD) and Hospital Episode Statistics (HES). *BMJ Open*, *7*(9), e017585. doi:10.1136/bmjopen-2017-017585
- Yilmaz, E., Abdul-Jabbar, A., Tawfik, T., Iwanaga, J., Schmidt, C. K., Chapman, J., . . . Oskouian, R. J. (2018). S2 Alar-Iliac Screw Insertion: Technical Note with Pictorial Guide. *World Neurosurgery*, *113*, e296-e301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.02.009>
- Yoshihara, H. (2012). Sacroiliac joint pain after lumbar/lumbosacral fusion: current knowledge. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*, *21*(9), 1788-1796. doi:10.1007/s00586-012-2350-8
- Zhai, W. J., Wang, Z. K., Liu, H. L., Qin, S. L., Han, P. F., & Xu, Y. F. (2024). Comparison between minimally invasive and open transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of multi-segmental lumbar degenerative disease: A systematic evaluation and meta-analysis. *Exp Ther Med*, *27*(4), 162. doi:10.3892/etm.2024.12450
- Zhong, D., Ke, Z., Wang, L., Liu, Y., Lin, L., Zeng, W., . . . Wang, Y. (2023). Comparative Clinical Efficacy and Safety of Sacral-2-Alar Iliac Screw Versus Iliac Screw in the Lumbosacral Reconstruction of Spondylodiscitis. *World Neurosurg*, *171*, e237-e244. doi:10.1016/j.wneu.2022.12.006
- Zich K., T. T. (2017). Faktencheck Rücken: Rückenschmerzbedingte Krankenhausaufenthalte und operative Eingriffe. Retrieved from [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/VV_FC_Rueckenoperationen Studie dt final.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/VV_FC_Rueckenoperationen_Studie_dt_final.pdf)
- Ziroglu, N., Duramaz, A., & Bayrak, A. (2021). Comparison of Functional and Radiological Outcomes of Transforaminal Lumbar Interbody Fusion and Posterolateral Fusion Techniques in the Treatment of Lumbar Spinal Stenosis. [Vergleich der funktionellen und radiologischen Ergebnisse der transforaminalen interkorporellen Fusion und der posterolateralen Fusion bei der Behandlung der lumbalen Spinalkanalstenose]. *Z Orthop Unfall*, *160*(06), 629-636. doi:10.1055/a-1471-8622

11 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Orthopädischen Universitätsklinik des Universitätsklinikums Tübingen an der Eberhard Karls Universität Tübingen zunächst unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. med. Nikolaus Wülker und Herrn PD Dr. med. Christian Walter begonnen und ab Februar 2023 von Herrn PD Dr. med. Christian Walter und Frau Dr. med. Sandra Frantz weitergeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn PD Dr. med. Christian Walter, Oberarzt und Bereichsleiter der Wirbelsäulenchirurgie am Universitätsklinikum Tübingen, Frau Dr. med. Sandra Frantz, Oberärztin der orthopädischen Universitätsklinik Tübingen und mir.

Die Proband:innenrekrutierung, die Datenerhebung via Fragebogenevaluation, Auswertung der medizinischen Vorberichte, Erfassung radiologischer Parameter und klinische Untersuchung nach Instruktion durch Frau Dr. med. Sandra Frantz und Herrn PD Dr. med. Christian Walter, führte ich eigenständig durch.

Die statistische Auswertung erfolgte unter Anleitung von Herrn PD Dr. med. Christian Walter durch mich.

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

Stuttgart, den 23. Januar 2025

Nicola Heller

12 Anhänge

12.1 Anhang 1: Oswestry Disability Index (ODI)

Bitte füllen Sie diesen Fragebogen aus. Er soll uns darüber informieren, wie Ihre Rücken- (oder Bein-)probleme Ihre Fähigkeit beeinflussen, den Alltag zu bewältigen. Wir bitten Sie, jeden Abschnitt zu beantworten. **Kreuzen Sie in jedem Abschnitt nur die Aussage an, die Sie heute am besten beschreibt.**

Abschnitt 1: Schmerzstärke

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich habe momentan keine Schmerzen. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan sehr schwach. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan mäßig. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan ziemlich stark. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan sehr stark. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Die Schmerzen sind momentan so schlimm wie nur vorstellbar. | 5 |

Abschnitt 2: Körperpflege (Waschen, Anziehen etc.)

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Meine Körperpflege durchzuführen ist schmerzhaft, und ich bin langsam und vorsichtig. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Ich brauche bei der Körperpflege etwas Hilfe, bewältige das meiste aber selbst. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich brauche täglich Hilfe bei den meisten Aspekten der Körperpflege. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann mich nicht selbst anziehen, wasche mich mit Mühe und bleibe im Bett. | 5 |

Abschnitt 3: Heben

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ich kann schwere Gegenstände heben, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann schwere Gegenstände heben, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran schwere Gegenstände vom Boden zu heben aber es geht, wenn sie geeignet stehen (z.B. auf einem Tisch). | 2 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran schwere Gegenstände zu heben, aber ich kann leichte bis mittelschwere Gegenstände heben, wenn sie geeignet stehen. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann nur sehr leichte Gegenstände heben. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann überhaupt nichts heben oder tragen. | 5 |

Abschnitt 4: Gehen

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich nicht daran so weit zu gehen, wie ich möchte. | 0 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 1–2 km zu gehen. | 1 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 0,5 km zu gehen. | 2 |
| <input type="checkbox"/> Schmerzen hindern mich daran, mehr als 100 m zu gehen. | 3 |
| <input type="checkbox"/> Ich kann nur mit einem Stock oder Krücken gehen. | 4 |
| <input type="checkbox"/> Ich bin die meiste Zeit im Bett und muss mich zur Toilette schleppen. | 5 |

Abschnitt 5: Sitzen

- Ich kann auf jedem Stuhl so lange sitzen, wie ich möchte. 0
- Ich kann auf meinem Lieblingsstuhl so lange sitzen, wie ich möchte. 1
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 1 Stunde zu sitzen. 2
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu sitzen. 3
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 10 Minuten zu sitzen. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu sitzen. 5

Abschnitt 6: Stehen

- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden. 0
- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 1 Stunde zu stehen. 2
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu stehen. 3
- Schmerzen hindern mich daran, länger als 10 Minuten zu stehen. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu stehen. 5

Abschnitt 7: Schlafen

- Mein Schlaf ist nie durch Schmerzen gestört. 0
- Mein Schlaf ist gelegentlich durch Schmerzen gestört. 1
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 6 Stunden. 2
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 4 Stunden. 3
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als 2 Stunden. 4
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu schlafen. 5

Abschnitt 8: Sexualleben (falls zutreffend)

- Mein Sexualleben ist normal und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Mein Sexualleben ist normal, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Mein Sexualleben ist nahezu normal, aber sehr schmerzhaft. 2
- Mein Sexualleben ist durch Schmerzen stark eingeschränkt. 3
- Ich habe aufgrund von Schmerzen fast kein Sexualleben. 4
- Schmerzen verhindern jegliches Sexualleben. 5

Abschnitt 9: Sozialleben

- Mein Sozialleben ist normal und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Mein Sozialleben ist normal, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Schmerzen haben keinen wesentlichen Einfluss auf mein Sozialleben, außer dass sie meine eher aktiven Interessen, z.B. Sport, einschränken. 2
- Schmerzen schränken mein Sozialleben ein und ich gehe nicht mehr so oft aus. 3
- Schmerzen schränken mein Sozialleben auf mein Zuhause ein. 4
- Ich habe aufgrund von Schmerzen kein Sozialleben. 5

Abschnitt 10: Reisen

- Ich kann überallhin reisen und die Schmerzen werden dadurch nicht stärker. 0
- Ich kann überallhin reisen, aber die Schmerzen werden dadurch stärker. 1
- Trotz starker Schmerzen kann ich länger als 2 Stunden unterwegs sein. 2
- Ich kann aufgrund von Schmerzen höchstens 1 Stunde unterwegs sein. 3
- Ich kann aufgrund von Schmerzen nur kurze, notwendige Fahrten unter 30 Minuten machen. 4
- Schmerzen hindern mich daran Fahrten zu machen, außer zur medizinischen Behandlung. 5

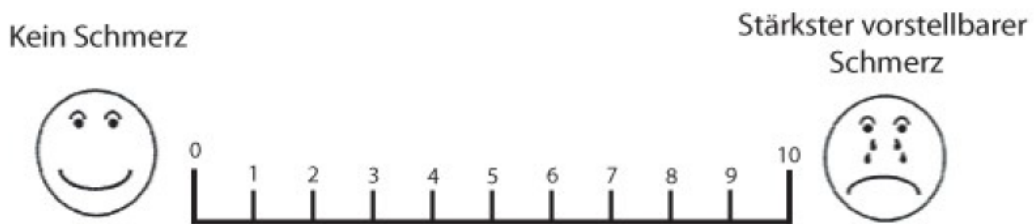
12.2 Anhang 2: Roland Morris Score (RMS)

Nr.	Beschreibung der Tätigkeit	X
1.	Wegen meiner Rückenschmerzen bleibe ich den größten Teil des Tages zu Hause.	
2.	Ich wechsele häufig meine Körperhaltung, um meinen Rücken zu entlasten	
3.	Ich gehe wegen meiner Rückenschmerzen langsamer als sonst	
4.	Wegen meiner Rückenschmerzen erledige ich keine der Arbeiten, die ich sonst im Haushalt erledige	
5.	Wegen meiner Rückenschmerzen halte ich mich beim Treppensteigen am Geländer fest	
6.	Wegen meiner Rückenschmerzen lege ich mich häufiger als sonst zum Ausruhen hin	
7.	Wegen meiner Rückenschmerzen muss ich mich an etwas abstützen, um aus einem Polstersessel hochzukommen	
8.	Wegen meiner Rückenschmerzen bitte ich andere Menschen, etwas für mich zu erledigen	
9.	Wegen meiner Rückenschmerzen brauche ich zum Ankleiden länger als sonst	
10.	Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, nur kurze Zeit zu stehen	
11.	Wegen meiner Rückenschmerzen achte ich darauf, mich so wenig wie möglich zu bücken oder niederzuknien	
12.	Wegen meiner Rückenschmerzen fällt es mir schwer, von einem Stuhl aufzustehen	
13.	Ich leide den größten Teil des Tages/der Nacht unter Rückenschmerzen	
14.	Meine Rückenschmerzen erschweren mir das Umdrehen im Bett.	
15.	Wegen meiner Rückenschmerzen ist mein Appetit nicht besonders gut.	
16.	Wegen meiner Rückenschmerzen habe ich Probleme beim Anziehen von Socken (oder Strümpfen/Strumpfhosen).	
17.	Wegen meiner Rückenschmerzen gehe ich nur kurze Strecken	
18.	Wegen meiner Rückenschmerzen schlafe ich weniger als sonst	
19.	Wegen meiner Rückenschmerzen brauche ich beim Ankleiden Hilfe	
20.	Wegen meiner Rückenschmerzen verbringe ich den größten Teil des Tages sitzend	
21.	Wegen meiner Rückenschmerzen versuche ich, schwere Arbeiten im Haushalt zu vermeiden	
22.	Wegen meiner Rückenschmerzen bin ich reizbarer und übellauniger als sonst	
23.	Wegen meiner Rückenschmerzen gehe ich Treppen langsamer hinauf als sonst	
24.	Wegen meiner Rückenschmerzen verbringe ich den größten Teil des Tages im Bett	

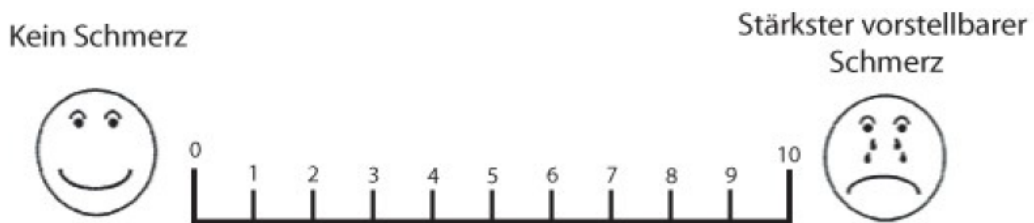
12.3 Anhang 3: Visuelle Analog Skala (VAS)

Bei den nächsten drei Fragen erkundigen wir uns nach Ihren Schmerzen über den **Zeitraum der letzten Woche**. Kennzeichnen Sie bitte den zutreffenden Wert mit einem Kreuz. 0 bedeutet kein Schmerz, 10 bedeutet den schlimmsten für Sie vorstellbaren Schmerz.

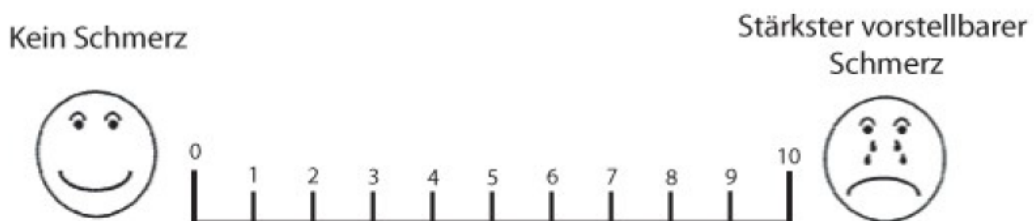
Wie stark sind Ihre Schmerzen bei körperlicher Belastung?



Wie stark sind Ihre Schmerzen in Ruhe?



Wie stark sind Ihre Schmerzen, wenn Sie nachts im Bett liegen?



13 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Menschen danken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. med. Christian Walter, für seine kompetente Betreuung, seine wertvollen Anregungen sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Ebenso möchte ich Frau Dr. med. Sandra Frantz für ihre hilfreichen Hinweise, die engagierte Begleitung und die stetige Unterstützung danken, die diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben.

Ein besonderer Ausdruck meiner Wertschätzung geht an meinen Papa, dessen unermüdliche Unterstützung mir während des gesamten Prozesses von unschätzbarem Wert war.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Schwester und meinen Freund:innen meinen tiefsten Dank aussprechen. Sie haben mir während dieser Arbeit den Rücken gestärkt und mitgeföhlt.