

DISSERTATION

Der Einfluss der degenerativen lumbalen Spondylolisthese
auf die paraspinale Muskulatur
Impact of degenerative lumbar spondylolisthesis on the
paraspinal muscles

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. dent. Ulrike Inge Kielburg

Erstbetreuung: PD Dr. med. Friederike Schömig

Datum der Promotion: 20.06.2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Zusammenfassung.....	10
Abstract	12
1. Einleitung.....	14
1.1. Rückenschmerz.....	14
1.2. Spondylolisthese.....	17
1.3. Bildgebung – Die Rolle der Magnetresonanztomografie	20
1.4. Therapie der degenerativen Spondylolisthese	23
1.5. Muskulatur und Rückenschmerz	27
1.6. Anatomische Grundlagen	29
1.7. Muskeldichtemessung	32
1.8. Ziele und Hypothesen.....	33
2. Material und Methode.....	34
2.1. Patienteneinschluss.....	34
2.2. Bestimmung der Muskeldichte.....	34
2.3. Messung der Wirbelkörpertranslation und Lordose	36
2.4. Statistische Auswertung	37
3. Ergebnisse.....	39
3.1. Patientenkohorte	39
3.2. Radiologische Parameter	41
3.3. Veränderung der Muskelzusammensetzung in Bezug auf das Geschlecht	43
3.4. Veränderung der Muskelzusammensetzung in Bezug auf BMI und Alter.....	44
3.5. Zusammenhang von Translation und Muskeldegeneration.....	45
3.6. Zusammenhang von Lordose und Muskeldegeneration.....	47
4. Diskussion.....	49
4.1. Einordnung der Ergebnisse in die Literatur.....	49
4.2. Die Rolle des M. multifidus bezüglich spinaler Stabilität.....	53
4.3. Postoperatives Ergebnis und Muskelstatus.....	56
4.4. Prähabilitation.....	57
5. Limitationen.....	61
6. Ausblick.....	62
7. Zusammenfassung.....	63
Literaturverzeichnis.....	64
Eidesstattliche Versicherung	75
Lebenslauf.....	76

Danksagung..... 77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Laterale Röntgenaufnahmen bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 Meyerding Grad 1	19
Abbildung 2: Laterale Röntgenaufnahmen bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 Meyerding Grad 3	19
Abbildung 3: Sagittaler (a.) und axialer (b.) MRT-Schnitt in T2-Wichtung bei degenerativer Spondylolisthese L4/5, Meyerding Grad 1, mit Bandscheibendegeneration, Facettengelenksarthrose, Hypertrophie des Ligamentum flaxum und Spinalkanalstenose.	21
Abbildung 4: Axialer MRT-Schnitt bei degenerativer Spondylolisthese mit Markierung des M. psoas (1), des M. multifidus (2) sowie des M. erector spinae (3).....	30
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Translation von LWK4 bei Vorliegen einer Spondylolisthese L4/5.	36
Abbildung 6: Darstellung der Messung der Translation von LWK4 bei Vorliegen einer Spondylolisthese L4/5 in einer konventionellen Röntgenaufnahme der LWS im Stehen.	37
Abbildung 7: Patienteneinschluss	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Demographische Daten sowie Laborparameter bei stationärer Aufnahme der eingeschlossenen Patient:innen. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung (Alter, Größe, Gewicht, BMI, Kreatinin, Albumin, Protein, Calcium, Calcium Korr., AST, ALT, A1C, Hb, CRP).....	40
Tabelle 2: Begleiterkrankungen (Diabetes, Bluthochdruck, COPD, Herzinsuffizienz und ASA-Stadien I, II, III. P-Werte wurden mittels Chi Quadrat Test ermittelt.	41
Tabelle 3: Parameter des sagittalen Profils anhand Messung in lateralen Röntgenbildern der LWS. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung, Signifikante Unterschiede wurden mittels des t-Tests ermittelt und sind markiert.	42
Tabelle 4: Verteilung der Meyerding-Grade nach Geschlecht. Statistische Signifikanz wurde mittels Mann-Whitney-U-Test ermittelt.....	42
Tabelle 5: Translationsausmaß nach Geschlecht mit Mittelwert und Standardabweichung sowie mittels t Test ermittelter signifikanter Unterschiede.....	43
Tabelle 6: Muskelzusammensetzung CSA, fCSA, FAT, FI des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas im Vergleich von Frauen und Männern sowie Darstellung der signifikanten Unterschiede mittels t Test	43
Tabelle 7: Abhängigkeit der Muskelparameter CSA, fCSA, FAT, FI des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas vom BMI: Beta, Standardfehler und p-Wert mittels linearer Regressionsanalyse ermittelt	44
Tabelle 8: Abhängigkeit der Muskelparameter CSA, fCSA, FAT, FI des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas vom Alter: Beta, Standardfehler, p-Wert mittels linearer Regressionsanalyse ermittelt	45
Tabelle 9: Korrelation der Fettinfiltration FI des MU, ES und PS mit der Translation im Bereich L4: mit Pearson-Korrelation ermittelt.....	45
Tabelle 10: Korrelation der CSA des MU, ES und PS mit der Translation im Bereich L4, mittels Pearson-Korrelation ermittelt	46
Tabelle 11: Korrelation der fCSA des MU, ES und PS mit der Translation im Bereich L4: mit Pearson-Korrelation ermittelt	46
Tabelle 12: Zusammenhang FI MU, ES, PS mit der Translation. Beta, Standardfehler, p-Wert mit einfacher linearer Regressionsanalyse ermittelt.....	46
Tabelle 13: Zusammenhang BMI, Alter, Geschlecht mit der Translation. Beta, Standardfehler, p-Wert mit einfacher linearer Regressionsanalyse ermittelt	47

Tabelle 14: Zusammenhang gesamte Lordose mit der FI MU, ES, PS. Beta, Standardfehler, p-Wert mit einfacher linearer Regressionsanalyse ermittelt.....	47
Tabelle 15: Zusammenhang segmentale Lordose mit der FI MU, ES, PS. Beta, Standardfehler, p-Wert mit einfacher linearer Regressionsanalyse ermittelt	47
Tabelle 16: Zusammenhang Lordose L4/5 mit der FI MU, ES, PS. Beta, Standardfehler, p-Wert mit einfacher linearer Regressionsanalyse ermittelt.....	48

Abkürzungsverzeichnis

ALT	Alanin-Aminotransferase
ALIF	Anterior lumbar interbody fusion
ASA	American Society of Anesthesiologists
AST	Aspartat-Aminotransferase
BMI	Body Mass Index
CA	Calcium
Ca.	Circa
Ca Korr	Calcium Korrektur
COPD	Chronic obstructive pulmonary disease
CT	Computertomografie
CRP	C-reaktives Protein
CSA	Cross-sectional area
ES	Musculus erector spinae
FAT	Intramuscular fat area
fCSA	Functional cross-sectional area
FI	Fatty infiltration
Ggf.	Gegebenenfalls
Hb	Hämoglobin
HU	Houndsfield units
Krea	Kreatinin
LLIF	Lateral lumbar interbody fusion
M.	Musculus
MRT	Magnetresonanztomografie
mSV	Millisievert
MU	Musculus multifidus
ODI	Oswestry Disability Index
PLIF	Posterior lumbar interbody fusion
PS	Musculus psoas
ROI	Region of interest
S1	1. sakraler Wirbelkörper
T	Tesla
TLIF	Transforaminal lumbar interbody fusion
Vs.	Versus
WHO	World Health Organization

Zusammenfassung

Einleitung:

Rückenschmerz zählt zu den führenden Herausforderungen unseres Gesundheitssystems und hat maßgeblichen Einfluss auf die Lebensqualität betroffener Patient:innen. Obwohl die degenerativ bedingte lumbale Spondylolisthese eine häufige spezifische Ursache für Rückenschmerz ist, besteht bis heute Uneinigkeit hinsichtlich ihrer Therapie. In der Untersuchung spinaler Pathologien sind in den letzten Jahren zunehmend Veränderungen der paraspinalen Muskulatur in den Fokus gerückt. Ihre Rolle bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese ist dagegen bisher wenig untersucht, sodass Ziel dieser Studie war, den Zusammenhang von Muskelveränderungen und dem Ausmaß einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 aufzuzeigen.

Material und Methode:

Es wurden retrospektiv von 01/2010 bis 12/2022 Patient:innen der Charité – Universitätsmedizin Berlin am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie mit operativer Therapie bei degenerativer Spondylolisthese im Bereich L4/5 eingeschlossen. Ausschlusskriterien waren fehlende oder unvollständige Bildgebung sowie eine vorherige lumbale Spondylodese. Anhand präoperativer Magnetresonanztomographie-Aufnahmen wurden die Parameter CSA (cross sectional area), fCSA (functional cross sectional area), FAT (intramuscular fat area) und FI (fatty infiltration) des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas mittels des Programms ImageJ ermittelt. Weiterhin wurden das Ausmaß der Wirbelkörpertranslation und sagittale Profilparameter mittels lateraler Röntgenaufnahmen gemessen. Es folgte die statistische Auswertung der Daten.

Ergebnisse:

Nach Ausschluss von 30 Patient:innen wurden 96 Patient:innen eingeschlossen. 61 der 96 Patient:innen waren weiblich und zeigten signifikant häufiger degenerative Spondylolisthese im Bereich L4/5 mit Meyerding Grad 2 sowie eine höhere lumbale Lordose als Männer (43,61 vs. 37,28, $p=0,003$).

Die multiple Regressionsanalyse ergab, dass ein höheres Ausmaß der Translation des LWK4 mit einer höheren FI des M. multifidus assoziiert ist ($b=0,436$, $p=0,009$).

Schlussfolgerung:

Die vorliegende Arbeit zeigt einen signifikanten Zusammenhang der Muskeldegeneration des M. multifidus mit dem Ausmaß der Translation des LWK4 bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5. Es ist demnach von einer gegenseitigen Beeinflussung der passiven Strukturen der Wirbelsäule und den aktiven paraspinalen Muskeln auszugehen. In Zukunft könnten gezielte Diagnostik und Training der paraspinalen Muskulatur das Gesamtergebnis sowohl im Rahmen der konservativen als auch der operativen Therapie degenerativer Spondylolisthesen beeinflussen.

Abstract

Introduction:

Back pain is one of the leading challenges in our healthcare system and has a significant impact on the quality of life of affected patients. Although degenerative lumbar spondylolisthesis is a common specific cause of back pain, there is still disagreement regarding its treatment. In recent years, the investigation of spinal pathologies has increasingly focussed on changes in the paraspinal musculature. However, their role in the presence of degenerative spondylolisthesis has been little investigated to date, so the aim of this study was to demonstrate the relationship between muscle changes and the extent of degenerative spondylolisthesis L4/5.

Material and methods:

From 01/2010 to 12/2022, patients of the Charité - Universitätsmedizin Berlin at the Centre for Musculoskeletal Surgery with surgical treatment of degenerative spondylolisthesis in the L4/5 region were retrospectively included. Exclusion criteria were missing or incomplete imaging and previous lumbar spondylodesis. The parameters CSA (cross sectional area), fCSA (functional cross sectional area), FAT (intramuscular fat area) and FI (fatty infiltration) of the multifidus, erector spinae and psoas muscles were determined on the basis of preoperative magnetic resonance imaging images using the ImageJ programme. Furthermore, the extent of vertebral body translation and sagittal profile parameters were measured using lateral X-ray images. Statistically analysis of the data followed.

Results:

After excluding 30 patients, 96 patients were included. 61 of the 96 patients were female and showed significantly more degenerative spondylolisthesis at L4/5 with Meyerding grade 2 and a higher lumbar lordosis than men (43.61 vs. 37.28, $p=0.003$).

The multiple regression analysis showed that a higher degree of translation of the LWK4 is associated with a higher FI of the multifidus muscle ($b=0.436$, $p=0.009$).

Conclusion:

This study shows a significant correlation between muscle degeneration of the multifidus muscle and the extent of translation of LWK4 in the presence of degenerative spondylolisthesis L4/5. It can therefore be assumed that the passive structures of the spine and the active paraspinal muscles influence each other. In future, targeted diagnostics and

preoperative training of the paraspinal muscles could influence the overall outcome of both conservative and surgical treatment of degenerative spondylolisthesis. This could contribute to the best possible patient-specific therapy based on future prospective studies.

1. Einleitung

1.1. Rückenschmerz

Rückenschmerz ist eine der führenden gesundheitlichen Herausforderungen der heutigen Zeit. So ergab eine epidemiologische Studie des Robert-Koch-Instituts (RKI) von 2019-2020 mit über 5.000 Befragungen, dass zwei Drittel der Deutschen innerhalb eines Jahres von Rückenschmerzen betroffen sind und ein Fünftel über chronische Rückenschmerzen, die länger als drei Monate anhalten und nahezu täglich auftreten, berichten. Frauen sind dabei signifikant häufiger betroffen als Männer (1). Als Ursachen für den geschlechtsspezifischen Unterschied werden eine geringere Muskelmasse, Unterschiede im Schmerzempfinden, der zentralen Schmerzverarbeitung und der Körperwahrnehmung sowie der Einfluss von Hormonen auf das Schmerzempfinden diskutiert (2) (1). Die Lebenszeitprävalenz von unteren Rückenschmerzen liegt zwischen 74% und 85% (3) und mit 14,3% sind Schmerzen im unteren Rücken in Deutschland der führende Grund für Lebensjahre mit Einschränkungen bzw. disability-adjusted-life-years (DALYs) (1). Auch weltweit wurde im Zeitraum von 1990 bis 2015 eine Zunahme der Lebensjahre mit Einschränkungen durch Rückenschmerzen um 54% festgestellt (4).

Rückenschmerzen, die in allen Alters- und Gesellschaftsgruppen auftreten, sind auch global die führende Ursache körperlicher Einschränkung, wobei sich durch das Bevölkerungswachstum und die steigende Lebenserwartung ergibt, dass die größte Zunahme von Einschränkungen durch Rückenschmerzen in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen zu verzeichnen ist (4). Dies stellt nicht nur betroffene Patient:innen, sondern auch die gesamte Gesellschaft vor enorme Herausforderungen. So lag die Arbeitsunfähigkeit durch Rückenschmerzen in Deutschland 2017 bei 6,1% und stellt damit die zweithäufigste Ursache für Krankmeldungen dar (5). Die Diagnosegruppe „sonstige Erkrankungen der Wirbelsäule und des Rückens“ wurde mit 22,1 Millionen Patient:innen laut Kassenärztlicher Vereinigung 2015 als häufigster Grund einer ambulanten Arztkonsultation genannt (6). Auch bei der Erwerbsunfähigkeit und Frühberentung spielen Rückenschmerzen als Ursache eine große Rolle. 2010 ließen sich 8,0% der Rentenneuzugänge auf Rückenschmerzen und Erkrankungen der Wirbelsäule zurückführen (3). Insgesamt sind Erkrankungen des muskuloskeletalen Systems damit nach psychischen Erkrankungen die zweithäufigste Ursache für einen frühzeitigen Renteneintritt (3). Dies verdeutlicht den massiven Einfluss von Wirbelsäulenerkrankungen auf wirtschaftlicher und gesundheitsökonomischer Ebene sowohl national als auch global.

Neben den gesamtgesellschaftlichen Implikationen von Rückenschmerz, führt er zu massiven Einschränkungen des täglichen Lebens für Betroffene. Zur verminderten Lebensqualität durch Rückenschmerzen tragen neben anhaltenden Schmerzen auch psychische Begleiterkrankungen wie Depressionen und Angststörungen bei. Die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten von Rückenschmerz und einer psychischen Begleiterkrankung lag in den Jahren 2005-2009 bei 18,9 - 20,9% (7).

Gleichzeitig erhöhen psychosoziale Faktoren („yellow flags“) das Risiko für eine Chronifizierung von Rückenschmerzen (8). Eine depressive Verstimmung, psychische Belastung, depressive Symptome und Somatisierung stellen hier die größten Risikofaktoren dar (9). Auch Katastrophisierung, passives Angst- und Vermeidungsverhalten oder überaktives Schmerzverhalten und schmerzbedingte Kognition sind für das Schmerzempfinden relevant (10).

Die Einteilung chronischer Schmerzen erfolgt nach Korff et al. durch die Ermittlung der Schmerzintensität und Beeinträchtigungen bei Alltagsaktivitäten in folgende fünf Grade (11):

Grad 0 – keine Schmerzen in den vergangenen sechs Monaten

Grad 1 – Schmerzen mit niedriger schmerzbedingter Funktionseinschränkung und niedriger Intensität

Grad 2 – Schmerzen mit niedriger schmerzbedingter Funktionseinschränkung und höherer Intensität

Grad 3 – mittlere schmerzbedingte Funktionseinschränkung

Grad 4 – hohe schmerzbedingte Funktionseinschränkung

Kreuzschmerz ist definiert als Schmerz, der unterhalb des Rippenbogens und oberhalb der Gesäßfalte lokalisiert ist. 38,5% der Patient:innen mit unterem Rückenschmerz geben außerdem an, dass zusätzlich ausstrahlende Schmerzen in den Beinen bestehen (1). Auch neurologische Symptome können begleitend auftreten. Ist eine Nervenwurzel akut oder chronisch beschädigt oder gereizt, besteht eine Radikulopathie, die sich in Schmerzen, Missempfinden, Sensibilitätsverlust, Reflexminderung oder Parese im jeweiligen Versorgungsgebiet äußert. Dies kann bei einer Polyradikulopathie auch mehrere Nervenwurzeln betreffen (12).

Es wird zwischen spezifischen und unspezifischen Kreuzschmerzen unterschieden, wobei beim unspezifischen Kreuzschmerz kein zugrundeliegendes bildmorphologisches Korrelat

vorliegt. Die Differenzierung der beiden Formen des Kreuzschmerzes ist klinisch nicht immer eindeutig. Meist handelt es sich bei erstmaligem Auftreten von Rückenschmerzen jedoch um unspezifische Kreuzschmerzen, die in 33% der Fälle nach drei Monaten nicht mehr nachweisbar sind (13). Besteht der Verdacht auf das Vorliegen eines solchen unspezifischen Kreuzschmerzes, ist eine radiologische Untersuchung zunächst nicht indiziert, da hierdurch keine positive Beeinflussung der Behandlung nachgewiesen werden konnte (14). Die Therapie des unspezifischen Kreuzschmerzes erfolgt immer konservativ, da mit manueller Therapie, Ergotherapie, Rückenschule, Wärmetherapie, kognitiver Verhaltenstherapie, Entspannungsverfahren, sowie ausführlicher ärztlicher Beratung über einen aktiven Lebensstil und Bewegungstherapie eine erhebliche Beschwerdeverbesserung erreicht werden kann (10). Unterstützend wird eine symptomatische Schmerztherapie angewendet, die auch zur Besserung der Mobilisation dient. Hier kommen Analgetika (nicht-steroidale Antirheumatika, Paracetamol, Novaminsulfon) und Opioid-Analgetika (niedrig und hochpotent) gemäß WHO-Stufenschema zum Einsatz (15). Ergänzend können Muskelrelaxantien und Antidepressiva wie nichtselektive Monoamin-Rückaufnahme-Inhibitoren verordnet werden (12). Sollte nach sechs Wochen keine Beschwerdeverbesserung eintreten oder die Schmerzen trotz konservativer Therapiemaßnahmen weiter zunehmen, ist eine Bildgebung indiziert (3).

Da bei Vorhandensein von Kreuzschmerzen aber auch spezifische Ursachen, die einer sofortigen Diagnostik und Therapie bedürfen, vorliegen können, gelten zur klinischen Entscheidungshilfe die sogenannten ‚red flags‘ als Screeninghilfe für pathologische Veränderungen als Ursache für akute Rückenschmerzen. Hier gilt es im ambulanten oder klinischen Bereich, unverzüglich diagnostische Maßnahmen einzuleiten.

Bei spezifischen Kreuzschmerzen lässt sich mittels radiologischer Diagnostik ein pathologisches Korrelat finden. Zu den Ursachen des spezifischen Rückenschmerzes gehören das lumbale Facettensyndrom, das diskogene Lumbalsyndrom einschließlich der Osteochondrosis vertebralis, der Morbus Bastrup, pathologische Prozesse in den Sakroiliakalgelenken, die Spinalkanalstenose, die axiale Spondylarthritis, der Bandscheibenvorfall, die traumatische oder pathologische Wirbelkörperfraktur, maligne oder infektiöse Prozesse sowie die Spondylolyse und Spondylolisthese (16). Auch myofasziale Dysfunktionen und hypomobile segmentale Dysfunktionen der Lendenwirbelsäule (LWS) im Sinne einer Blockierung können für spezifische Kreuzschmerzen ursächlich sein (16). Die Therapie des spezifischen Kreuzschmerzes unterscheidet sich erheblich je nach

zugrundeliegender Pathologie und kann neben konservativen Maßnahmen auch die operative Versorgung beinhalten.

1.2. Spondylolisthese

Mit einer Prävalenz von bis zu 40% zählt die degenerative Spondylolisthese zu den häufigsten Ursachen des spezifischen Kreuzschmerzes. Neben der degenerativen Form des Wirbelgleitens können nach der Einteilung nach Wiltse und Rothmann folgende Ursachen für die Entstehung der Spondylolisthese vorliegen (17):

Typ 1 – Angeborene oder dysplastische Spondylolisthese

Subtyp A: axiale Ausrichtung der dysplastischen Gelenkfortsätze (oft kombiniert mit Spina bifida)

Subtyp B: sagittale Ausrichtung der Gelenkfortsätze

Subtyp C: kongenitale Kyphose und weitere kongenitale Anomalie

Typ 2 – Isthmische Spondylolisthese

Subtyp A: lytisch

Subtyp B: sekundäre Elongation der Pars interarticularis

Typ 3 – Degenerative Spondylolisthese

Typ 4 – Traumatische Spondylolisthese

Typ 5 – Pathologische Spondylolisthese

Typ 6 – Postoperative Spondylolisthese

In unserer Untersuchung liegt der Fokus auf der degenerativen Form der Spondylolisthese im Bereich des 4. und 5. Lendenwirbelkörpers (LWK). Mit 63,6% ist bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese das Wirbelgleiten des 4. häufiger als das Gleiten des 5. LWK mit 13,6% (18). Auslöser ist dabei eine Degeneration der Bandscheibe mit Höhenminderung, die zu unphysiologischer Überbelastung der Facettengelenke und deren Hypertrophie führt (18). Auch die Ausrichtung der Facettengelenke kann zum Wirbelgleiten beitragen. Hier begünstigt eine sagittale Ausrichtung, wie sie im Bereich L4/5 im Vergleich zu L5/S1 vorliegt, das Gleiten (19). Ebenso kann eine entzündliche Veränderung der Facettengelenke im Sinne einer Arthritis zu verminderter Stabilität und folglich einem Wirbelgleiten führen (20). Weitere Faktoren sind eine verminderte Funktion des Bandapparats durch Überdehnung sowie eine verminderte muskuläre Stabilisierung (20). Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass Frauen bis zu vier Mal häufiger von degenerativen Spondylolisthesen betroffen

sind, da durch hormonelle Einflüsse wie beispielsweise im Rahmen einer Schwangerschaft Veränderungen der Band- und Gelenkstrukturen auftreten (21).

Klinisch imponieren Patient:innen mit degenerativer Spondylolisthese mit einer breiten Symptomvarianz. Nicht jede Spondylolisthese führt zu Beschwerden. Klassischerweise wird jedoch von Rückenschmerzen berichtet, die im Falle einer Spinalkanalstenose von einer Gehstreckenminderung im Sinne einer Claudicatio intermittens spinalis begleitet werden. Besteht eine Affektion von Spinalnerven können zusätzlich Dermatom-bezogene Schmerzausstrahlungen in die Beine mit sensiblen oder motorischen Defiziten vorliegen. Dabei besteht keine Korrelation des Grads des Wirbelgleitens mit der Schmerzsymptomatik und neurologischen Symptomen (12).

Schmerzen bei Vorliegen einer Spondylolisthese lassen sich in drei Gruppen einteilen.

Wirbelgleiten, Hypertrophie des Ligamentum flavum und Osteophyten der Facettengelenke führen zu einer Einengung des Spinalkanals, die sich klinisch durch Schmerzen, Parästhesie, Taubheit und Schwäche in den Beinen als Claudicatio intermittens spinalis äußert. Durch steigenden epiduralen Druck wird angenommen, dass Blutgefäße komprimiert werden, wodurch es zu einer Minderversorgung der Nervenzellen mit Sauerstoff kommt (19).

Radikuläre Schmerzen entstehen durch Druck auf die Nervenwurzel sowie durch die Wirkung von Entzündungsmediatoren. Mechanische Schmerzen des unteren Rückens entstehen bei Alltagsaktivitäten und verschiedenen Haltungen (19). Dabei konnte gezeigt werden, dass Instabilitätstests wie z.B. die passive Extension in geringem Maße mit der Schmerzintensität, sowie in hohem Maße mit dem Grad der Einschränkung bei symptomatischer Spondylolisthese korrelieren (22).

Die Einteilung des Ausmaßes des Wirbelgleitens erfolgt nach Meyerding anhand von lateralen Röntgenaufnahmen der LWS im Stehen. Hier wird der Grad der Translation aus der Position der Hinterkante des nach ventral abgeglittenen Wirbelkörpers in Bezug zur Hinterkante des kaudalen Wirbelkörpers bestimmt und prozentual dazu angegeben (23).

Grad 1 – weniger als 25%

Grad 2 – 25 bis 50%

Grad 3 – 50 bis 75%

Grad 4 – 75 bis 100%

Grad 5 – Spondyloptose (kein Kontakt der beiden Wirbelkörper)

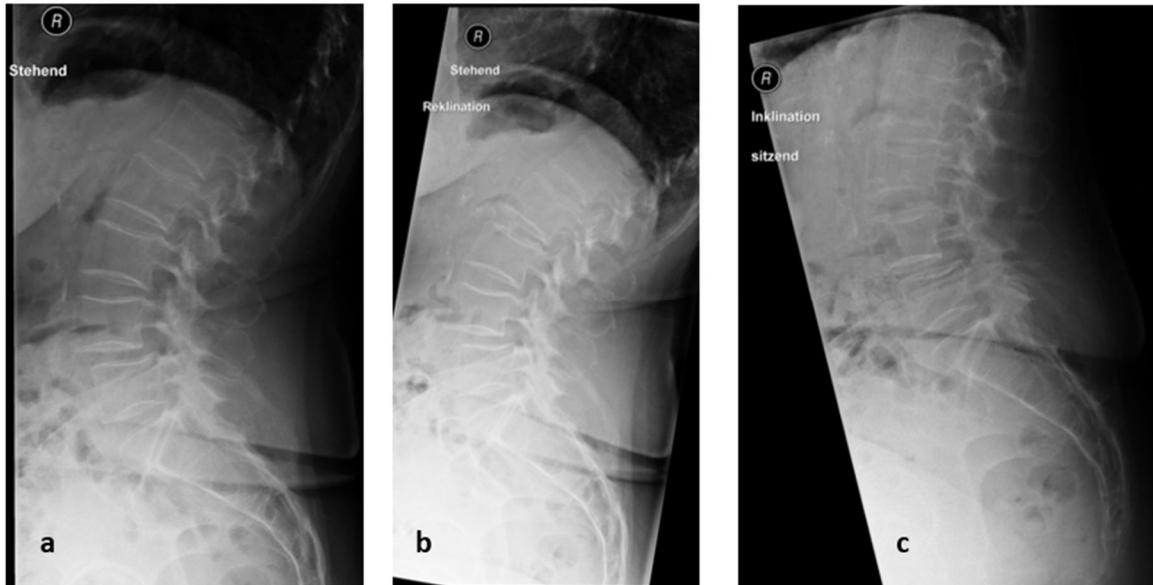


Abbildung 1: Laterale Röntgenaufnahmen bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 Meyerding Grad 1. a) Stehend, b) Inklination, c) Reklination.

Am häufigsten liegen die Grade 1 und 2 vor, die als geringgradige Translation gelten. Grad 3 und 4 beschreiben eine hochgradige Translation und kommen im Rahmen degenerativer Veränderungen seltener vor.

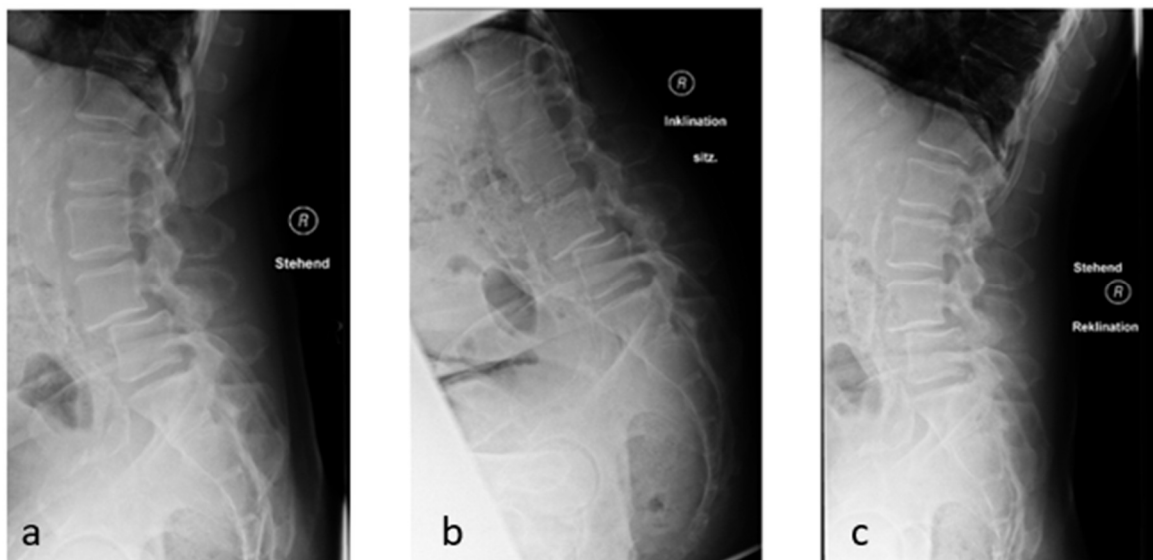


Abbildung 2: Laterale Röntgenaufnahmen bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 Meyerding Grad 2. a) Stehend, b) Inklination, c) Reklination.

Obwohl die Klassifikation der Spondylolisthese nach Meyerding keinen Rückschluss auf einen Therapieerfolg erlaubt, stellt sie durch leichte klinische Handhabung eine Grundlage für die Therapieentscheidung dar (23).

1.3. Bildgebung – Die Rolle der Magnetresonanztomografie

Zur radiologischen Basisdiagnostik der degenerativen Spondylolisthese sind laut Leitlinie Röntgenaufnahmen der LWS in zwei Ebenen im Stand anzufertigen. Ergänzend sollte eine seitliche Röntgenaufnahme der gesamten Wirbelsäule zur Beurteilung der sagittalen Balance bei Planung eines operativen Eingriffs durchgeführt werden (12).

In der stehenden seitlichen Röntgenaufnahme ist aufgrund der Belastungsaufnahme vor allem das Ausmaß des Wirbelgleitens deutlich sichtbar (24). Seitliche Röntgenaufnahmen sollten zur genaueren Darstellung der Translation zusätzlich in Inklinaton und Reklination durchgeführt werden, da die dynamische Komponente für therapeutische Entscheidungen eine Rolle spielt (25).

Während eine Spondylolisthese prinzipiell auch mittels der Computertomographie (CT) dargestellt werden kann, wird dieses bildgebende Verfahren aufgrund der hohen Strahlenbelastung bei unterlegener Darstellung von Weichgeweben nur bei Kontraindikationen für die Durchführung einer Magnetresonanztomografie (MRT) eingesetzt. In diesem Fall sollte sie in der Regel als CT-Myelographie durchgeführt werden, um eine gegebenenfalls vorliegende begleitende Spinalkanalstenose darzustellen (20).

Prinzipiell gilt als schnittbildgebendes Verfahren der Wahl bei Vorliegen einer Spondylolisthese nach erfolgloser konservativer Therapie oder bei neurologischen Defiziten neben den dargestellten konventionellen Röntgenaufnahmen die MRT. Zudem empfiehlt die Leitlinie ‚Spezifischer Kreuzschmerz‘ die Untersuchung mittels MRT zur Planung einer operativen Behandlung (12). Bei Kontraindikationen zur Durchführung einer MRT, nicht schlüssigen oder nicht aussagekräftigen MRT-Befunden, kann eine CT auch ergänzend durchgeführt werden (26).

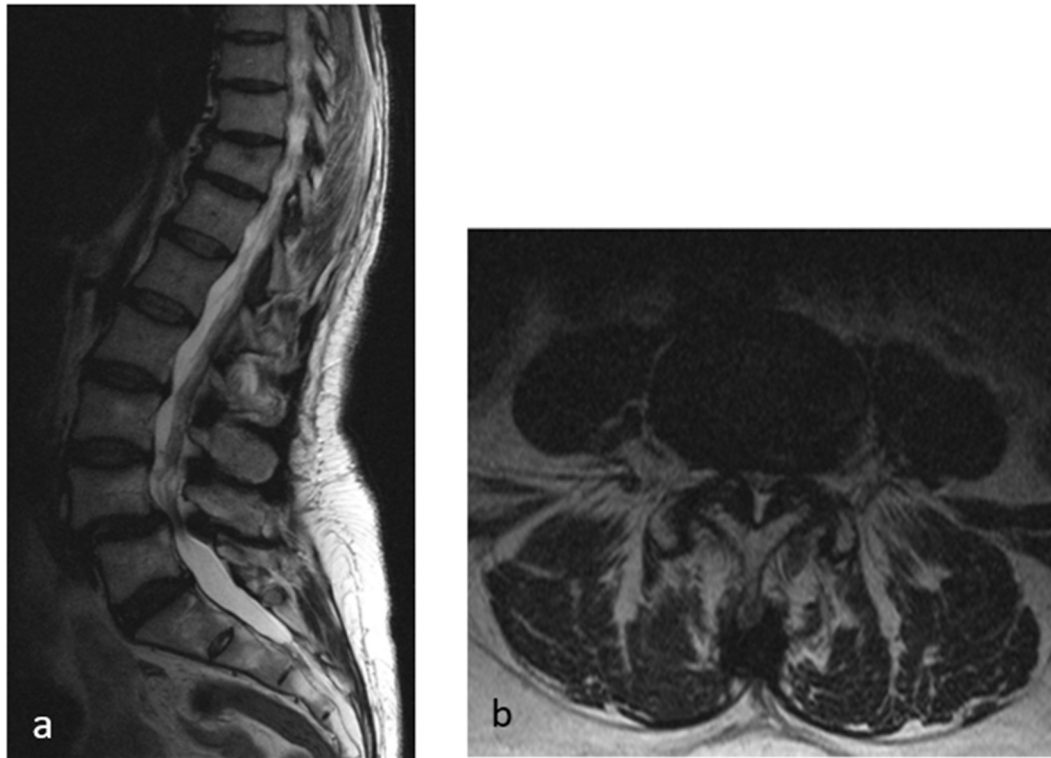


Abbildung 3: Sagittaler (a.) und axialer (b.) MRT-Schnitt in T2-Wichtung bei degenerativer Spondylolisthese L4/5, Meyerding Grad 1, mit Bandscheibendegeneration, Facettengelenksarthrose, Hypertrophie des Ligamentum flavum und Spinalkanalstenose.

Bis heute gibt es kein einheitliches Protokoll mit vorgegebenen Sequenzen zur Durchführung einer MRT-Untersuchung der Wirbelsäule oder des Rückenmarks. Zur Basisdiagnostik sollten in axialer und sagittaler Ebene jedoch Fast Spin Echo Sequenzen mit T2-Wichtung und Spin-Echo-Sequenzen mit T1-Wichtung durchgeführt werden (27). Eine standardmäßige Gabe von Kontrastmittel ist nicht notwendig. Zur Darstellung von Bandscheiben und Knochenläsionen sind T1-, T2- und Sequenzen mit unterdrückten Fettsignal wie beispielsweise STIR (short tau inversion recovery) anzuwenden (27).

In Zukunft können auch Funktionsaufnahmen wie das ‚diffusion tensor imaging‘ (DTI) und ‚magnetization transfer‘ (MT) zu einer verbesserten Darstellung der Mikrostruktur und Funktion des Rückenmarks beitragen (28). Hierbei spielen Sequenzen mit spezifischen Impulsen eine große Rolle, wie sie bereits in der Darstellung des Gehirns erfolgreich Anwendungen finden (29). Ob eine genauere Darstellung des Rückenmarks die Operationsentscheidung bei Spondylolisthese beeinflusst oder Rückschlüsse auf die Schmerzentstehung erlaubt, bleibt in Zukunft zu untersuchen.

Betrachtet man den Unterschied zwischen Aufnahmen mit verschiedenen magnetischen Feldstärken (1,5 und 3 T) zeigt sich eine bessere örtliche Auflösung, je größer die Feldstärke

ist. Dagegen sind Aufnahmen mit 3 T anfälliger für die Entstehung von verschiedenen Arten von Artefakten. Limitierend in der Anwendung von MRT-Geräten mit größerer Feldstärke von bis zu 7 Tesla und damit verbundener besseren Auflösung ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), die die Absorption elektromagnetischer Strahlung in Watt/Kilogramm in einem Magnetfeld angibt, und zur Erwärmung des Körpers führt. Die SAR ist abhängig von der Feldstärke, der Stromdichte und der spezifischen Temperaturentwicklung im Gewebe (30).

Artefakte durch Fremdmaterial können sowohl CT- als auch MRT-Aufnahmen in ihrer Aussage beeinträchtigen. In der CT sind vor allem Aufhärungsartefakte relevant, die durch die Entwicklung der Mehrkanal-CT und verbesserter Soft- und Hardware minimiert werden konnten (31). In MRT-Aufnahmen spielen vor allem Suszeptibilitätsartefakte eine Rolle, die durch lokale Magnetfeldinhomogenitäten am Übergang zwischen verschieden stark magnetischen Geweben oder zu metallischen Fremdkörpern entstehen (32). Zur besseren Darstellung bei vorhandenen metallischen Implantaten können schnelle Spinecho Sequenzen und STIR-Sequenzen, sowie eine kleine Voxelgröße Anwendung finden (31). Titan, als einer der wichtigsten Werkstoffe für Osteosynthesematerial, Schrauben und Cages führt zu einer geringen Artefaktentstehung in der unmittelbaren Umgebung des Materials (33). Ursächlich sind Wirbelströme im Material selbst, die durch ein entgegengesetztes Magnetfeld entstehen (34).

Untersuchungen zeigen, dass im Stehen das Ausmaß des Gleitens bei degenerativer Spondylolisthese im Vergleich zum Liegen größer ist, sodass 28% der Patient:innen mit vorhandener degenerativer Spondylolisthese im MRT nicht diagnostiziert werden (35). Zur optimalen Darstellung einer Einengung des Spinalkanals unter Belastung in CT und MRT bei symptomatischen Patient:innen wäre eine axiale Belastung während der Untersuchung notwendig, die mittels Zuggewichten an liegenden Patient:innen theoretisch simuliert werden könnte (36). Dies entspricht einer rein theoretischen Optimierung der Bildgebung, die technisch und klinisch nicht umsetzbar ist, weshalb hier die konventionelle Röntgenaufnahme im Stehen durch die einfache und schnelle klinische Durchführung relevant ist. So kann ein im Liegen nicht darstellbares Wirbelgleiten durch eine zusätzliche Röntgenaufnahme im Stehen sicher diagnostiziert werden (36).

1.4. Therapie der degenerativen Spondylolisthese

Die Leitlinie ‚Spezifischer Kreuzschmerz‘ empfiehlt bei symptomatischer Spondylolisthese ohne alltagsrelevante frische Paresen der assoziierten Nervenwurzeln zunächst eine konservative Behandlung der Rückenschmerzen (12). Dies beinhaltet eine angepasste Schmerzmedikation, Physiotherapie, Ergotherapie, stabilisierende Übungen, Belastungsreduktion des betroffenen Segments und ggf. eine lokale Infiltration. Zur Vermeidung einer Schmerzchronifizierung ist außerdem eine ausführliche ärztliche Aufklärung und Eruiierung von psychischen Komorbiditäten angeraten. Sollte bereits eine Chronifizierung (Schmerzen, die länger als drei Monate bestehen) stattgefunden haben, beinhalten weiterführende Maßnahmen eine komplexe Schmerztherapie sowie Verhaltens- und Psychotherapie (12). Die Dauer der konservativen Therapie ist individuell zu betrachten, wobei meist eine Evaluation des Erfolgs der konservativen Maßnahmen nach sechs Wochen erfolgt.

Bei klinisch persistenten Rückenschmerzen trotz mindestens dreimonatiger konservativer Therapie oder bei Vorhandensein eines neurologischen Defizits wird eine Operation zunehmend empfohlen (12). Laut Leitlinie ‚Spezifischer Kreuzschmerz‘ soll die Operation ein dekomprimierendes Verfahren mit oder ohne zusätzlicher segmentaler Stabilisierung beinhalten (12).

Die Anzahl durchgeführter Operationen bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese zeigte zwischen 2007 und 2015 eine starke Zunahme mit einer Steigerung von 57% der durchgeführten Spondylodesen und einer Steigerung von 130% der knöcherner Dekompressionen ohne Versteifung (37). Eine Untersuchung aus den USA über einen Zeitraum von 20 Jahren (1998 – 2008) ergab eine Zunahme von 11,6% an durchgeführten primären lumbalen Spondylodesen mit einer absoluten sowie einer an das Bevölkerungswachstum angepassten Zunahme der Operationen (38).

Trotz der Häufigkeit des Krankheitsbildes herrscht bis heute keine klare Behandlungsempfehlung bezüglich des operativen Vorgehens, wobei insbesondere die Frage, ob ein rein dekomprimierendes Vorgehen zu vergleichbaren Ergebnissen wie ein fusionierendes Verfahren führt, besteht (39). Dies verdeutlicht den Forschungsbedarf auf dem Gebiet der degenerativen Spondylolisthese, um in Zukunft evidenzbasierte und fundierte klinische Entscheidungen treffen zu können.

Eine Umfrage zum Thema Dekompression oder Fusion der betroffenen Wirbelsegmente unter 381 Mitgliedern der ‚Lumbar Spine Research Society‘ und ‚Society of Minimally Invasive Spine Surgery‘ im Jahr 2022 ergab, dass fast 40% der Befragten in mehr als drei Viertel der Fälle eine Fusion der betroffenen Segmente durchführen. Knapp 20 % der Befragten würden immer eine Fusion durchführen. Bei der Dekompression würde über die Hälfte der Befragten eine partielle Laminektomie durchführen, fast ein Drittel eine komplette Laminektomie. Die radiologischen Parameter, die bei der Therapieentscheidung ausschlaggebend waren, sind das Ausmaß der Instabilität sowie der Grad der Spondylolisthese und der Laterolisthese. Als klinische Parameter waren unterer Rückenschmerz, Aktivitätsgrad und Claudicatio intermittens spinalis entscheidend (40).

Als mögliche operative Verfahren bei degenerativer Spondylolisthese stehen also die partielle oder totale Laminektomie und gegebenenfalls zusätzlich die Fusion mittels PLIF (posterior lumbar interbody fusion), TLIF (transforaminal lumbar interbody fusion), ALIF (anterior lumbar interbody fusion) oder LLIF (lateral lumbar interbody fusion) zur Verfügung. Für alle fusionierenden Verfahren wurden in einer Metanalyse 2017 nach Durchsicht radiologischer, operativer und klinischer Befunde und Ergebnisse ähnliche Erfolge in der Fusionsrate beschrieben (41).

In der Regel erfolgt die Fusion bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese jedoch über einen dorsalen Zugang. Nach Darstellung der spinalen Strukturen und Instrumentation mittels Pedikelschrauben und Resektion des Dornfortsatzes werden eine Laminektomie oder Laminotomie sowie eine Facettengelenksresektion durchgeführt, um anschließend die nervalen Strukturen zu dekomprimieren. Daraufhin erfolgt das Aufspreizen des Bandscheibenfachs und die Retraktion des Duraschlauchs sowie das Entfernen der Bandscheibe. Grund- und Deckplatten werden angefrischt, bevor ein mit autologer oder allogener Spongiosa gefüllter Cage eingebracht wird. Dieser dient als intervertebraler Platzhalter und besteht meist aus Titan oder Polyetheretherketon (PEEK) (42). Autologer Knochen wird bei der Dekompression und Laminektomie gesammelt, allogener Knochen steht als Knochenersatzmaterial zu Verfügung, wobei kein Unterschied in den Fusionsraten von allogenen oder autologem Knochen besteht (43). Allogener Knochen besitzt gute osteokonduktive Eigenschaften, wohingegen autologes Material zusätzlich osteoinduktiv wirkt (44). Im Anschluss werden die Längsstäbe des internen Fixateurs angebracht, über die eine axiale Kompression zur weiteren Lordosierung erfolgen kann.

Durch die Retraktion des Duraschlauchs besteht die Gefahr einer Nervenschädigung, welche mit 8% beschrieben wird, wohingegen die Gesamtkomplikationsrate laut Literatur bei 17% liegt (45). In einer Untersuchung zeigte die Fusion mittels offenen posterioren und transforaminalen Zugang ähnliche Erfolgsraten, wobei im Rahmen der TLIF weniger Komplikationen, Blutverlust und eine geringere Operationsdauer auftraten (45). Dabei besteht kein Unterschied in den postoperativen Ergebnissen der offenen oder minimalinvasiv durchgeführten TLIF (46). Bei allen Techniken kann es bei verminderter Stabilität der Endplatten zum Einsintern der Cages kommen, was die Notwendigkeit einer sorgfältigen Präparation hervorhebt (47).

Beim anterioren Zugang wird von der linken Unterbauchseite ausgehend mittels stumpfer Präparation durch die Bauchmuskulatur nach lateral zum Retroperitonealraum präpariert, wobei der M. psoas als Leitstruktur dient. Es folgt das Aufsuchen und Präparation der Aorta, der V. cava, der Iliakalgefäße und des Ureters. Nach Darstellung des Bandscheibensegments folgt die Inzision des vorderen Längsbands, die Ausräumung der Bandscheibe mit Anfrischen der Grund- und Deckplatte und das Einbringen eines Cages. Im Anschluss wird die Stabilisierung von dorsal mittels Schrauben und Stäben durchgeführt, wofür dann ein zweiter operativer Zugang nötig ist, der die Operationszeit deutlich verlängert (42).

Da der Spinalkanal beim rein anterioren Operationszugang nicht präpariert werden muss, ist die neurale Komplikationsrate geringer. Nachteil des anterioren Zugangs ist die höhere Rate an Gefäßverletzungen und der damit einhergehende Blutverlust, sowie die längere Operationsdauer (48). Der anteriore Zugang findet vor allem bei höhergradigen isthmischen Spondylolisthesen Bedeutung, da größere Cages eingebracht werden können und damit eine bessere Reposition erfolgt.

Alternativ ist auch ein lateraler Zugang (LLIF) möglich, der vor allem zur minimalinvasiven Versorgung des Segments L4/5 mit großen Cages bedeutend ist (42).

Die Gesamtkomplikationsrate liegt bei 14% , wobei der Anteil an intraoperativen Komplikationen unabhängig des Verfahrens 9% beträgt und die postoperative Komplikationsrate bei 5% liegt (49).

Die Entscheidung über das operative Vorgehen wird insbesondere hinsichtlich der Frage, ob eine Fusion notwendig ist, bis heute kontrovers diskutiert. Wichtige Parameter für die Entscheidung über Dekompression mit oder ohne Fusion sind radiologische und

patientenspezifische Befunde, sowie die Erfahrungen und Präferenzen des Operateurs bzw. der Operateurin (50).

Die Zusammenschau der Literatur bis 2005 ergab, dass eine alleinige Dekompression aufgrund der postoperativen Entstehung von Pseudarthrosen keinen ausreichenden Therapieerfolg bringt, sodass eine Dekompression mit Fusion gefordert wurde (19). Eine Übersichtsarbeit aus 2014 ergab dagegen keine klare Empfehlung über die Art des operativen Vorgehens, den Erfolg der jeweiligen Operation oder Komplikationsraten (51). Eine Studie, die retrospektiv das Ergebnis von 58 Patient:innen mit alleiniger Dekompression und 66 Patient:innen mit Dekompression und Fusion untersuchte, zeigte, dass kein Unterschied im Behandlungserfolg (durch Evaluation des Oswestry Disability Index, ODI) zwischen beiden Operationstechniken zwei Jahre postoperativ vorlag (52).

Der ODI wird zum Aufzeigen der Einschränkungen, die Patient:innen durch Schmerzen des unteren Rückens erleben, eingesetzt und gilt seit über 30 Jahren als Hilfe, funktionelle Einschränkungen zu quantifizieren. Dabei werden jeweils fünf Abstufungen von Schmerzintensität, Körperpflege, Heben, Gehen, Sitzen, Schlafen, Sozialleben, Reisen und Anstellung/ Hausarbeit erhoben. Anhand des Punktwertes kann der Grad der Einschränkung ermittelt werden (53).

Keine Einschränkung: 0-4 Punkte

Milde Einschränkung: 5-14 Punkte

Moderate Einschränkung: 15-24 Punkte

Schwere Einschränkung: 25-34 Punkte

Vollständige Einschränkung: 35-50 Punkte

Der ODI ist damit ein weltweit etabliertes und validiertes Instrument zur Erfassung des Therapieerfolgs bei Schmerzen des unteren Rückens sowie des Krankheitsverlaufs (54).

Analog zur deutschen Leitlinie wird auf Basis der Daten des multizentrischen ‚Spine Patient Outcomes Research Trial‘ (SPORT) zunächst ein konservatives Vorgehen gefordert, da viele Patient:innen alleine durch konservative Therapiemaßnahmen eine Verbesserung der Symptomatik erfahren und keinen operativen Risiken ausgesetzt sind (35). Bei dynamisch bestehender Stabilität kann eine alleinige Dekompression als ausreichende operative

Maßnahme betrachtet werden, während bei bestehender Instabilität die zusätzliche Stabilisierung gefordert wird (35).

Eine 2016 veröffentlichte prospektiv-randomisierte Studie mit 66 symptomatischen Patient:innen aus den USA mit Spondylolisthese Grad 1 kam zu dem Schluss, dass zwei, drei und vier Jahre nach Operation die lumbale Laminektomie und Stabilisierung bessere Ergebnisse als die alleinige Laminektomie lieferte (55). In der gleichen Ausgabe des *New England Journal of Medicine* kam eine ebenfalls randomisiert, kontrollierte Studie aus Schweden mit 247 Patient:innen mit lumbaler Spinalkanalstenose mit Instabilitätszeichen zu dem Schluss, dass die kombinierte Dekompression mit Stabilisierung keinen Vorteil im Vergleich zur alleinigen Dekompression brachte. Dies galt sowohl für ein Nachsorgeintervall von zwei, als auch von mehr als fünf Jahren, wobei nach fünf Jahren nur noch ca. zwei Drittel der Patientengruppe teilnahmen (56). Der Widerspruch verdeutlicht, wie kontrovers das operative Vorgehen zu betrachten ist. Die alleinige Dekompression bringt gegenüber der Fusion den Vorteil einer weniger invasiven, technisch weniger aufwändigen und zeitsparenden Operation, sowie eines kürzeren stationären Aufenthalts, was insgesamt stationäre Behandlungskapazität, sowie Kosten spart und somit auch von gesundheitsökonomischer Relevanz ist.

1.5. Muskulatur und Rückenschmerz

Neben der genannten spinalen Stabilität wird als weiterer Einflussfaktor für den Operationserfolg zunehmend auch der Zustand der Rückenmuskulatur diskutiert. Der Zusammenhang von unteren Rückenschmerzen und Veränderungen in der Rückenmuskulatur ist daher Gegenstand aktueller Forschung. Für die Stellung der Wirbelsäule spielen lumbale paraspinale Muskeln wie die Mm. erector spinae und multifidus eine wichtige Rolle. In der Bildgebung zeigt sich die Degeneration der Muskulatur als verminderte Muskelgröße, geringere radiografische Dichte und zunehmende Verfettung. Eine Verfettung der Muskulatur, die in der MRT gut darstellbar ist, tritt als späte Folge von Muskeldegeneration auf und betrifft vor allem die Muskelbereiche, die an degenerativ veränderte Gebiete angrenzen (57).

Dabei ist die muskuläre Fettinfiltration ein der Muskelatrophie überlegener Parameter zur Vorhersage postoperativer Beschwerden, da die Muskelfunktion stärker von der Fettinfiltration als von der Atrophie beeinflusst wird. Eine stärker ausgeprägte Fettinfiltration

des M. multifidus ist postoperativ mit größeren Einschränkungen (mittels ODI bestimmt) und persistierenden Schmerzen einhergehend (58). Eine schwere Sarkopenie im Bereich des M. multifidus korreliert nach dorsaler Spondylodese außerdem mit einer höheren Rate an proximaler junktionaler Kyphose und Therapieversagen (59). Diese Ergebnisse legen also nahe, dass der Zustand der paraspinalen Muskulatur Einfluss auf das Operationsergebnis bei lumbalen Operationen hat. Eine Metaanalyse kam außerdem zu dem Schluss, dass im Rahmen der Behandlung verschiedener degenerativer spinaler Pathologien postoperativ persistierende Schmerzen des unteren Rückens durch eine höhere Fettinfiltration des M. multifidus vorherzusehen waren (58). Hier hätte also die Beurteilung der Muskulatur präoperativ das Risiko für postoperative Beschwerden vorhersagen können (58).

Mit abnehmendem Muskeldurchmesser (cross-sectional area, CSA) wurde außerdem eine Zunahme der Beschwerden im unteren Rücken festgestellt. Die individuell durch Rückenschmerzen resultierenden Einschränkungen wurden mittels des 23 Fragen umfassenden ‚Roland morry disability questionnaire‘ objektiviert. Die Schmerzintensität stand zwar nicht in direktem Zusammenhang mit abnehmender CSA, eine größere CSA der paraspinalen Muskulatur war jedoch mit geringeren Einschränkungen einhergehend (60).

Die lumbale Wirbelsäule wird segmental vor allem durch den M. multifidus stabilisiert. Dieser besteht überwiegend aus Typ 1 Muskelfasern, die anfälliger für eine Atrophie durch Immobilisation sind, was wiederum die Schmerzentstehung begünstigt (61). Eine Atrophie des Muskels kann aber auch durch Schmerzen des unteren Rückens verursacht werden, da diese eine Inhibition und Aktivitätsverteilung auslösen können (62).

Atrophie und Fettinfiltration der paraspinalen Muskelgruppen wirken sich außerdem postoperativ negativ auf die Knochenheilung aus und sind mit Lockerung der Pedikelschrauben sowie Degeneration oder Kyphosierung in benachbarten Segmenten assoziiert (63).

Der Einfluss der paraspinalen Muskulatur auf die Knochenqualität der Pedikel, die unter anderem zur operativen Verankerung von Pedikelschrauben relevant ist, wurde mittels μ CT-Messungen intraoperativ gewonnener Knochenbiopsien sowie Muskeldichtemessungen an präoperativen MRT-Aufnahmen untersucht. Hier zeigte sich eine Korrelation der Mikroarchitektur des Knochens mit der CSA der paraspinalen Muskulatur und eine negative Korrelation zur Fettinfiltration der paraspinalen Muskeln (64).

Die präoperative Betrachtung der paraspinalen Muskulatur kann den Operateur:innen demnach helfen, das Risiko für Misserfolg mit persistierenden Schmerzen und funktionellen Einschränkungen einzuschätzen. Hier ist vor allem die Betrachtung der Fettinfiltration des M. multifidus relevant (58). So können auch Anhaltspunkte gegeben werden für die Entscheidung, eine Operation nicht durchzuführen. Ist durch starke Fettinfiltration des M. multifidus von einer geringen paraspinalen Muskelfunktion auszugehen, sodass eine geringere Verbesserung der klinischen Situation zu erwarten ist, kann dies das therapeutische Vorgehen beeinflussen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Betrachtung der paraspinalen Muskulatur zukünftig helfen kann, Patient:innen zu filtern, die von einer Operation bei degenerativer Spondylolisthese profitieren.

1.6. Anatomische Grundlagen

Die Rückenmuskulatur lässt sich entsprechend der embryonalen Entwicklung und Innervation in oberflächliche (sekundär eingewanderte) und tiefe (autochthone) Muskelgruppen einteilen. Im Gegensatz zur autochthonen Rückenmuskulatur dient die oberflächliche Muskulatur überwiegend der Bewegung der oberen Extremität und des Thorax und wird von den Rami ventrales der Spinalnerven innerviert. Für die Bewegung und Stabilisierung der Wirbelsäule ist dagegen die autochthone Muskulatur verantwortlich, die von den Rami dorsales der Spinalnerven innerviert wird. Der Unterschied zur Skelettmuskulatur sind große Muskelbäuche mit vergleichsweise kleinen Sehnen, was zu großem Druck und Steifigkeit führt (65). Zur autochthonen Rückenmuskulatur zählen im Bereich der Lendenwirbelsäule der M. multifidus sowie der M. erector spinae, der aus den Mm. longissimus, iliocostalis und spinalis besteht und den größten Anteil der autochthonen Rückenmuskulatur darstellt (66). Er dient der Wirbelsäulenstreckung und der Rotation. Bei einseitiger Kontraktion kommt es zur Seitneigung. Die Funktion des M. erector spinae spielt bei vielen komplexen Bewegungsabläufen wie dem Aufstehen oder Gehen eine entscheidende Rolle.

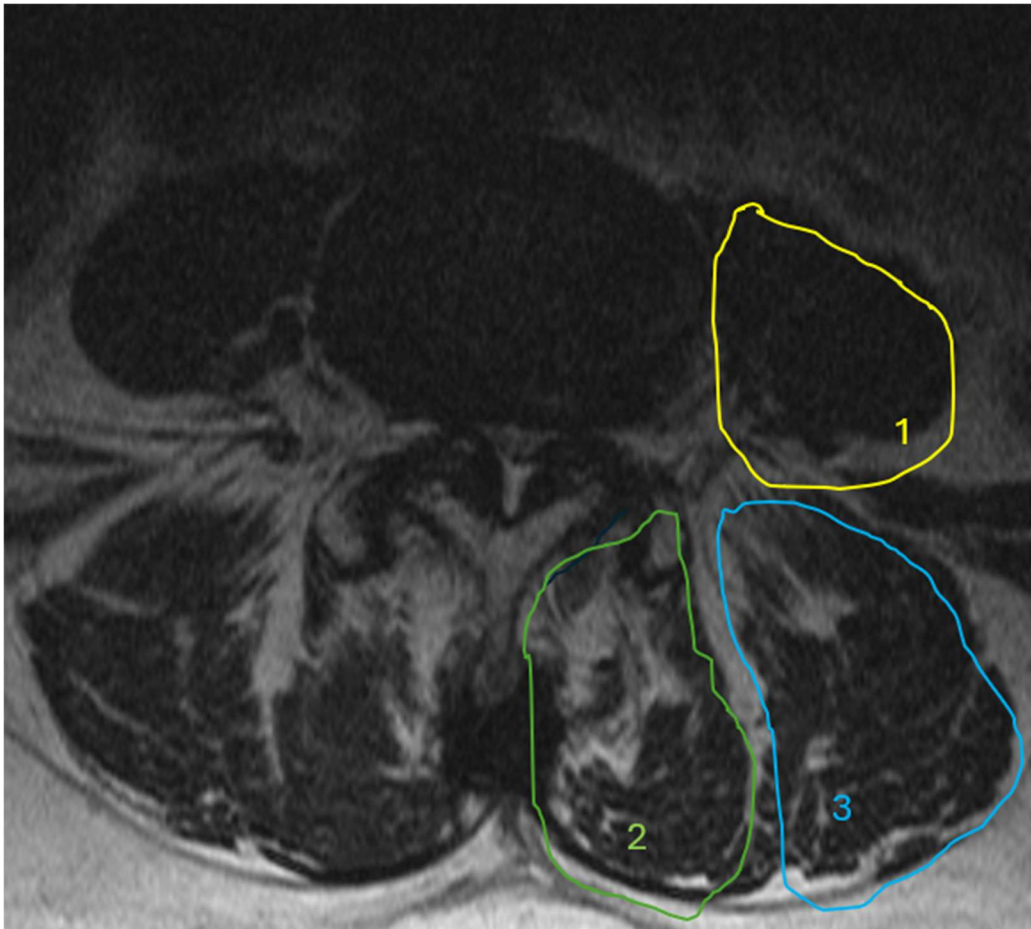


Abbildung 4: Axialer MRT-Schnitt bei degenerativer Spondylolisthese mit Markierung des M. psoas (1), des M. multifidus (2) sowie des M. erector spinae (3).

Der M. multifidus gehört zur Gruppe des transversospinalen Systems und ist vor allem im Bereich der LWS kräftig ausgebildet. Die Muskelanteile entspringen lateral an den jeweiligen Processus transversi und inserieren zwei bis vier Wirbelkörper weiter kranial an den jeweiligen Processus spinosi (66). Dies bedingt eine segmentale Anordnung mit einer segmentalen Stabilisierung des jeweiligen Wirbelsäulenabschnitts (67). Bei beidseitiger Kontraktion kommt es zur Dorsalflexion, bei einseitiger Kontraktion zur Rotation oder Seitwärtsneigung.

Zudem dienen die Muskeln des intertransversalen Systems zur Stabilisierung der Bewegungssegmente und Unterstützung der jeweiligen Bewegung, vor allem im Hals -und Lendenwirbelsäulenbereich.

Im ventralen Bereich der LWS bilden vom lateralen Wirbelkörperanteil, den Processus transversi und den Bandscheiben der M. psoas major und der M. psoas minor den M. psoas,

der zu Trochanter major und Os pubis verläuft und der seitlichen Neigung der Wirbelsäule und der Beugung im Lendenwirbelbereich dient (66).

Bedeckt wird die tiefe Rückenmuskulatur von der Fascia thoracolumbalis, die sie von der oberflächlichen Rückenmuskulatur trennt. Medial ist die Faszie an den Processus spinosi fixiert, kranial geht sie kontinuierlich in die oberflächliche Halsfaszie über (66).

Die Stabilität der Wirbelsäule wird passiv durch einen Bandapparat und aktiv durch das Zusammenspiel der verschiedenen Muskelgruppen erreicht (68). Dabei spielt das Prinzip antagonistisch kontrahierender Muskelgruppen zum Erreichen eines Gleichgewichts eine große Rolle.

Besonders hervorzuheben ist das komplexe Zusammenspiel zwischen der dargestellten Muskulatur mit den passiven Bestandteilen der Wirbelsäule wie den Wirbelkörpern, Bandscheiben und Bandstrukturen. Kommt es zu Veränderungen dieser passiven Bestandteile, geht dies auch mit einer muskulären Anpassung einher. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass bei Vorliegen eines Bandscheibenvorfalles auch eine veränderte Zusammensetzung zugunsten eines höheren Anteils an Verfettung des M. multifidus besteht (69). Eine Muskelveränderung verursacht auf der anderen Seite auch eine Veränderung in der Biomechanik und damit eine progrediente Degeneration der passiven Strukturen (60). Dies verdeutlicht den Einfluss der Muskulatur auf die Entstehung behandlungsbedürftiger Erkrankungen der Wirbelsäule.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Betrachtung des Einflusses der Muskulatur auf Erkrankungen der Wirbelsäule ist der histopathologische Aufbau der Muskulatur, wobei sie sich mikroskopisch in langsame (Typ I) Fasern, die sich durch überwiegend oxidative Energiegewinnung auszeichnen, schnelle (Typ IIx) Fasern mit überwiegend anaerober Energiegewinnung und schnelle Mischfasern (Typ IIa) einteilen lässt. Die Ausdauerfähigkeit der Muskelzellen nimmt mit dem Gehalt an Mitochondrien und Myoglobin, die den Grad der oxidativen Energiegewinnung bestimmen, zu. Im ersten Lebensjahr bilden sich die Muskelfasertypen vollständig aus, können aber im Laufe des Lebens durch Einflüsse wie mechanische Belastung, hormonelle Veränderungen oder neuromuskuläre Anpassungsvorgänge Änderungen durchlaufen (70).

Neben der Muskelfaserzusammensetzung hängt die Muskelkraft und Kontraktionsgeschwindigkeit von der Anzahl an Muskelfasern, dem physiologischen Querschnitt (pCSA) und der Länge des Muskelbauchs ab (68). Der pCSA ist dabei als Lot zur

Muskelfaserverlaufsrichtung definiert, wohingegen sich der anatomische Querschnitt im Bereich der maximalen Ausdehnung des Muskelbauches befindet.

1.7. Muskeldichtemessung

Die primären Extensoren und Flexoren der lumbalen Wirbelsäule sind die Mm. erector spinae, psoas major und multifidus. Bildmorphologisch kann die Qualität der Muskulatur anhand der CSA und Fettinfiltration in CT oder MRT beurteilt werden.

Die Muskelmasse nimmt im Alter ab und wird durch nicht kontraktionsfähiges Bindegewebe ersetzt. Bei der Sarkopenie sind Anzahl und Größe der Muskelfasern reduziert, wobei hier vor allem schnelle Muskelfasern des Typs IIX betroffen sind (71). Bei der Verfettung spielen Muskelstammzellen („Satellitenzellen“) eine entscheidende Rolle. Diese mesenchymalen Stammzellen, die Muskelwachstum durch hohe Plastizität, Selbsterneuerung und Regeneration bedingen, können adipozytenähnliche Eigenschaften annehmen und damit adipozytenspezifische Genexpression und Fettansammlung erreichen (72). Verschiedene molekulare Kaskaden und Faktoren wie zum Beispiel Wachstumsfaktoren, Hypoxie oder mitochondriale Sauerstoffradikalproduktion scheinen die Umwandlung von Satellitenzellen zu Adipozyten zu begünstigen. Dies erklärt die Zellumwandlung unter pathologischen Bedingungen und im Alter (72). Übergewicht im Sinne eines erhöhten body-mass-index (BMI) ist dagegen nicht mit einer vermehrten Verfettung der Muskulatur in den beiden kaudalen Segmenten der Lendenwirbelsäule assoziiert (57).

Die Bestimmung der Muskeldichte und der Fettinfiltration kann in der CT mit Hilfe der Messung von Hounsfield Units (HU) erfolgen und erwies sich bei Patient:innen mit chronischen Schmerzen des unteren Rückens als reliabel (74). Hier wurde auf Höhe L4/5 die Dichte des M. multifidus und des M. erector spinae mit der mittleren Dichte in HU verglichen und daraus ein Index errechnet, der den Muskelabbau beschreibt. Die Fettinfiltration der paraspinalen Muskulatur wurde dann in ein System mit drei Abstufungen eingeteilt (75). Die Bestimmung der Fettinfiltration und der CSA der paraspinalen Muskulatur im MRT kann dagegen entweder aus der spezifischen Signalintensität von Fettgewebe abgeleitet, oder aus dem Verhältnis der fettinfiltrierten CSA zur gesamten CSA berechnet werden (57). Es konnte eine gute Reliabilität in der Befundung der muskulären Fettinfiltration festgestellt werden. Auch wurde in einer weiteren Untersuchung deutlich, dass das Ausmaß der Fettinfiltration in der paraspinalen Muskulatur bei Erwachsenen mit zunehmenden Rückenschmerzen assoziiert ist (76).

Auch für Patient:innen mit sagittaler Fehlstellung im Bereich der Wirbelsäule oder am Übergang zum Becken konnte gezeigt werden, dass eine vermehrte Fettinfiltration der angrenzenden Muskulatur vorlag. Dies kann das Risiko für postoperative Komplikationen und Schmerzen erhöhen (77). Zur Berechnung der Fettinfiltration wurde hier eine Intensitätsschwelle für Pixel festgelegt. Pixel unterhalb der Schwelle sind als Muskel, Pixel oberhalb der Schwelle als Fett zu werten. Mittels weiterer Parameter wie CSA, Summe des Querschnitts der Muskulatur auf beiden Seiten der Wirbelsäule und Körpergröße konnte die Fettinfiltration ausgerechnet werden (77) (78).

1.8. Ziele und Hypothesen

Primäres Ziel der vorliegenden Promotionsarbeit war es, zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Translation des LWK4 im Rahmen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 mit dem Ausmaß degenerativer Veränderungen der paraspinalen Muskulatur (M. erector spinae, M. multifidus, M. psoas) besteht. Hierbei wurde das Ausmaß der Translation des LWK4 bestimmt und der Zusammenhang mit Veränderungen der Muskulatur hinsichtlich ihrer MRT-morphologischen CSA und Fettinfiltration analysiert. Zudem wurde der Einfluss relevanter Faktoren der Patient:innen wie Vorerkrankungen, Größe, Gewicht oder Geschlecht untersucht.

2. Material und Methode

2.1. Patienteneinschluss

Ein positives Ethikvotum der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin liegt vor (EA2/194/22). Patient:innen, die aufgrund einer degenerativen Spondylolisthese zwischen Januar 2010 und Dezember 2020 am Centrum für Muskuloskelettale Chirurgie der Charité – Universitätsmedizin Berlin operativ versorgt wurden, wurden retrospektiv eingeschlossen. Die Indikation zur operativen Versorgung bestand bei radiologisch gesicherter degenerativer Spondylolisthese L4/5 sowie unter mindestens dreimonatiger konservativer Therapie persistierendem Rückenschmerz und/oder einem vorhandenen neurologischen Defizit. Hierfür wurden mittels Durchsicht der Operationsprotokolle Patient:innen herausgefiltert, die eine isolierte Versteifung des Segments L4/5 durchlaufen hatten. Die Operationstechnik hierfür war eine dorsale Dekompression, intersomatische Fusion und Repositionsspondylodese L4/5. Versteifungen über mehrere Segmente oder außerhalb des Bereichs L4/5 führten zum Studienausschluss. Weitere Ausschlusskriterien waren traumatische, pathologische, kongenitale und isthmische Spondylolisthesen. Bei allen Studienteilnehmer:innen lag also eine degenerative Ursache des Wirbelgleitens (Typ 3 nach Wiltse (17)) vor. Auch nicht vorhandene Volljährigkeit, fehlende radiologische Aufnahmen (MRT und/oder laterale Röntgenaufnahme im Stehen), sowie vorangegangene Operationen im Bereich der Wirbelsäule führten zum Studienausschluss.

Weitere Patientendaten über Alter, Geschlecht, Vorerkrankungen, Körpergröße, Körpergewicht, BMI und ASA-Kriterien (American Society of Anesthesiology) wurden über die elektronische Patientenakte der Krankenhaussoftware ‚SAP‘ aufgerufen. Die Patientendaten wurden für die weitere Auswertung pseudonymisiert.

Alle radiologischen Messungen erfolgten mittels der Phönix-PACS Software (Phönix-PAXS GmbH, Freiburg im Breisgau, Deutschland).

2.2. Bestimmung der Muskeldichte

Die Studienebene wurde im Bereich der Bandscheibe zwischen dem 4. und 5. LWK im Transversalschnitt der jeweils vorliegenden T2-gewichteten Spinecho-Sequenz festgelegt. Die aufgesuchten Schnittbilder wurden für die folgende Auswertung exportiert. Zur Bestimmung der Muskelmessung wurden die einzelnen MRT-Schnittbilder im DICOM-Format im

Bildbearbeitungs- und Verarbeitungsprogramm ImageJ Version 2023 (National Institutes of Health, Bethesda Maryland, USA) aufgerufen. Es folgte die Markierung der studienrelevanten Muskelgruppen (regions of interest, ROI).

Dabei wurden ventral jeweils rechts und links der M. psoas (PS) sowie im Bereich der dorsalen autochthonen Rückenmuskulatur der M. multifidus (MU) und M. erector spinae (ES) markiert. Die Fascia thoracolumbalis diente hier als Leitstruktur zur Begrenzung der autochthonen Rückenmuskulatur.

Es wurden die Querschnittsfläche (cross section area CSA, cm²), die funktionelle Querschnittsfläche (functional cross section area fCSA, cm²), die intramuskuläre Verfettung (intramuscular fat area FAT, cm²) und die Fettinfiltration (FI, %) gemessen. Die CSA, auch anatomische Querschnittfläche genannt, ist definiert als Lot zur Verlaufsrichtung des Muskels im Bereich der maximalen Dicke des Muskelbauchs. Hingegen ist die fCSA das Lot zur Muskelfaserverlaufsrichtung und stellt die physiologische Querschnittfläche des Muskels dar. Sie lässt sich wie folgt berechnen (79):

$$fCSA = \frac{\text{Muskelmasse}}{\text{Muskeldichte}} \times \text{Muskelfaserlänge}$$

Intramuskuläre Verfettung stellt sich in der MRT mit T2-Wichtung verglichen mit Muskelgewebe hyperintens dar. Die Bestimmung von fCSA und FAT erfolgte im Programm ImageJ mittels Berechnung aus den Signalintensitätsunterschieden. Hierfür wurde ein Grenzwert festgelegt. Pixel, die über diesem Grenzwert lagen, erschienen hyperintens und wurden als Fett definiert. Hingegen wurden Pixel, die unterhalb dieses Grenzwertes lagen als Muskelmasse definiert und erschienen hypointens. Dieses Vorgehen zur Bestimmung der Muskelverfettung ist in der Literatur beschrieben und etabliert (78) (80). Die Fettinfiltration wurde anschließend mit folgender Formel berechnet:

$$FI = \left(\frac{\text{FAT}}{\text{CSA}} \right) * 100.$$

Die Angabe der Fettinfiltration erfolgt in Prozent. Linke und rechte Seite der Muskeln wurden zusammengefasst und in Relation zur Körpergröße gesetzt (81).

2.3. Messung der Wirbelkörpertranslation und Lordose

Bei allen Studienteilnehmer:innen lagen konventionelle anterior-posterior durchgeführte Röntgenaufnahmen der lumbalen Wirbelsäule im Stehen sowie laterale Aufnahmen im Stehen sowie in Inklination und Reklination vor. Anhand der lateralen Aufnahmen wurde das Ausmaß des Wirbelgleitens bestimmt. Hierfür wurde das Wirbelgleiten in fünf Grade nach Meyerding eingeteilt (23). Zur Bestimmung des Ausmaßes der Translation wurde eine Linie durch die Hinterwand des 5. LWK gezeichnet, sowie das Lot dazu im Bereich des kranialen Wirbelkörpers gefällt. Es wurde dann ausgehend vom posterior-inferioren Punkt des LWK4 im 90-Grad-Winkel das Ausmaß der Translation in mm bestimmt (82) (Abb. 5 und 6). Das gleiche Vorgehen wurde für die Messung der Translation in den Röntgenaufnahmen in Inklination und Reklination verfolgt.

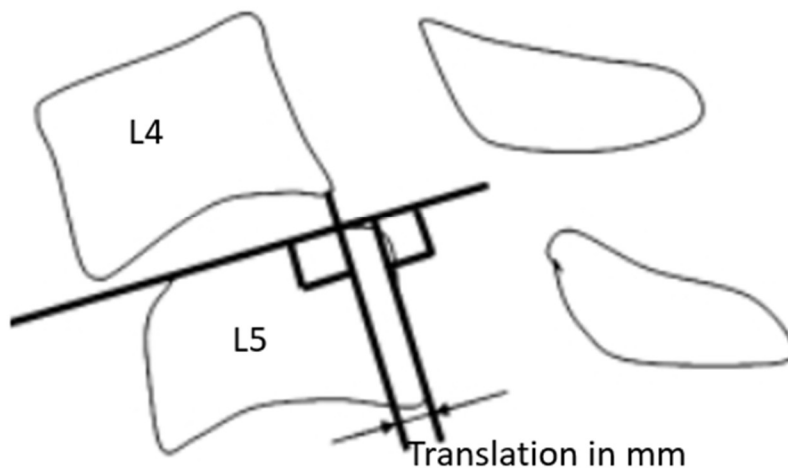


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Messung der Translation von LWK4 gegenüber LWK5 bei Vorliegen einer Spondylolisthese L4/5.

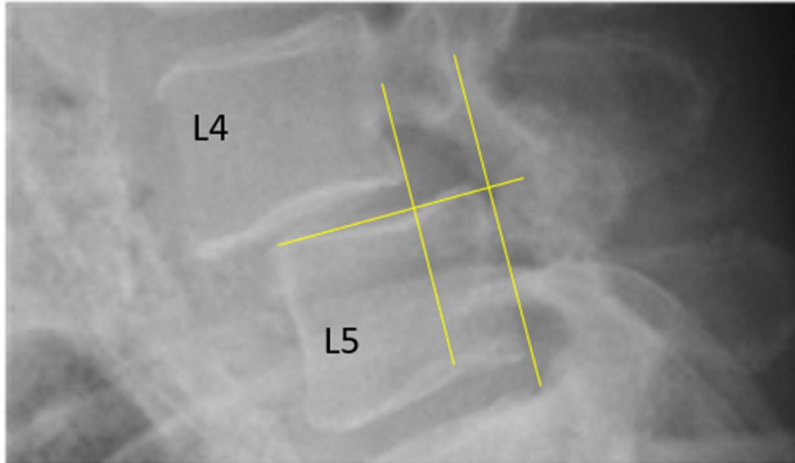


Abbildung 6: Darstellung der Messung der Translation von LWK4 bei Vorliegen einer Spondylolisthese L4/5 in einer konventionellen Röntgenaufnahme der LWS im Stehen.

Die lumbale Gesamtlordose wurde in lateralen Röntgenaufnahmen von der Deckplatte LWK1 bis zur Deckplatte SWK1 gemessen. Die segmentale Lordose wurde von der Deckplatte LWK4 bis zur Grundplatte LWK5 gemessen. Zusätzlich wurde der Bandscheibenwinkel L4/5 von der Grundplatte LWK4 zur Deckplatte LWK5 gemessen.

2.4. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mittels des Programms SPSS Statistics (IBM, Version 29.0.1.0). Es wurde eine deskriptive und induktive Statistik angefertigt.

Kategorische Variablen wurden in den Ergebnissen als ganze Zahlen aufgelistet (=N).

Um statistische Unterschiede aufzuweisen, wurde mittels t-Test bei normalverteilten, unabhängigen Stichproben auf Signifikanz geprüft. Bei fehlender Normalverteilung erfolgte der Mann-Whitney-U-Test als nichtparametrisches Äquivalent zum t-Test.

So erfolgte die Prüfung auf geschlechtsspezifische signifikante Unterschiede für Begleiterkrankungen, ASA-Stadien, Lordose, der Einteilung der Spondylolisthese nach Meyerding und Translation. Signifikante Unterschiede der Muskelparameter FI, CSA und fCSA zwischen Männern und Frauen wurden mittels Mann-Whitney-U-Test ermittelt.

Um den Zusammenhang der Translation von LWK4 mit der Fettinfiltration der jeweiligen Muskeln (M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas) zu untersuchen, wurde die Pearson-Korrelation berechnet.

Außerdem erfolgte die Berechnung des Zusammenhangs der Muskelparameter Fettinfiltration, CSA und fCSA des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas mit der

Translation des 4. LWK. Dies wurde mittels einer Regressionsanalyse untersucht. Ziel dieser statistischen Untersuchung war, die abhängige Variable Translation des 4. LWK durch mehrere unabhängigen Variablen zu erklären. Als unabhängige Variablen wurden FI, CSA und fCSA des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas festgelegt.

Die Korrelation von Alter, BMI und Geschlecht mit dem Anteil an muskulärer Verfettung (FI) wurde mittels einfacher linearer Regressionsanalysen bestimmt.

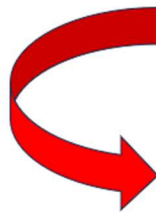
Die Untersuchung des Zusammenhangs der Lordose (Gesamtlordose, Lordose im Bereich L4/5 und segmentaler Lordose) und Fettinfiltration des M. multifidus, M. erector spinae und M. psoas erfolgte mittels einer Regressionsanalyse.

Hierbei wurde der Regressionskoeffizient, die Standardfehler und Signifikanz dargestellt. Statistische Signifikanz wurde definiert als ein p-Wert $< 0,05$.

3. Ergebnisse

Es wurden 126 Patient:innen identifiziert, die in den Jahren 2010 bis 2020 an der Charité Universitätsmedizin Berlin am Centrum für Muskuloskelettale Chirurgie bei Vorliegen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 eine dorsale Spondylodese erhalten hatten. Jeweils 15 Patient:innen wurden aufgrund unvollständiger Bildgebung oder einer vorherigen Operation an der LWS ausgeschlossen, sodass insgesamt 96 Patient:innen eingeschlossen wurden (Abb. 7).

**126 Patient: innen mit
vorheriger lumbaler
Operation im Bereich L4/5**



30 Patient:innen ausgeschlossen

- fehlende/ unvollständige Bildgebung (N=15)
- vorherige lumbale Spondylodese (N=15)

96 Studienteilnehmer:innen

Abbildung 7: Patienteneinschluss

3.1. Patientenkohorte

Die demographischen Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Betrachtung der Geschlechtsverteilung ergab, dass 61 Studienteilnehmer:innen weiblich (63,5 %) und 35 (36,5 %) männlich waren. Das Alter der Patientinnen lag zum Zeitpunkt der Operation zwischen 48 und 84 Lebensjahren, der Patienten zwischen 51 und 87 Lebensjahren. Der BMI lag bei den Patientinnen zwischen 17,78 und 44,06 kg/m² und bei den Patienten zwischen 18,68 und 28,21 kg/m². Die Darstellung der Standardabweichung und den Perzentilen liefern Hinweise, dass keine Extremwerte für Alter, Größe, Gewicht und BMI in der Patientenkohorte bei Männern und bei Frauen vorlagen.

	Gesamtheit (N= 96)	Frauen (N= 61)	Männer (N= 35)
Alter	69,71 ($\pm 10,2$)	68,7 ($\pm 0,02$)	71,49 ($\pm 10,39$)
Größe	168,17 ($\pm 8,42$)	163,8 ($\pm 6,3$)	175,80 ($\pm 6,3$)
Gewicht	78,54 ($\pm 5,84$)	73,3 ($\pm 12,4$)	87,54 ($\pm 17,17$)
BMI	27,69 ($\pm 4,85$)	27,4 ($\pm 4,97$)	28,21 ($\pm 4,67$)
Laborparameter:			
Kreatinin	0,97 ($\pm 0,37$)	0,93 ($\pm 0,43$)	1,05 ($\pm 0,25$)
Albumin	43,68 ($\pm 3,11$)	43,75 ($\pm 3,10$)	43,57 ($\pm 3,25$)
Protein	73,14 ($\pm 4,32$)	72,71 ($\pm 4,66$)	73,96 ($\pm 3,54$)
Calcium	2,37 ($\pm 0,12$)	2,38 ($\pm 0,12$)	2,37 ($\pm 0,11$)
Calcium Korr.	2,33 ($\pm 0,10$)	2,21 ($\pm 0,10$)	2,24 ($\pm 0,08$)
AST	27,37 ($\pm 11,86$)	26,12 ($\pm 11,87$)	29,50 ($\pm 11,72$)
ALT	27,63 ($\pm 26,78$)	25,66 ($\pm 29,02$)	31,00 ($\pm 22,47$)
A1C	37,35 ($\pm 5,35$)	40,50 ($\pm 5,64$)	34,64 ($\pm 3,51$)
Hb	13,62 ($\pm 1,48$)	13,17 ($\pm 1,49$)	14,37 ($\pm 1,15$)
CRP	3,77 ($\pm 6,60$)	3,95 ($\pm 7,10$)	3,48 ($\pm 5,75$)

Tabelle 1: Demographische Daten sowie Laborparameter bei stationärer Aufnahme der eingeschlossenen Patient:innen. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Zwischen weiblichen und männlichen Patient:innen zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der untersuchten Komorbiditäten Diabetes, Bluthochdruck, Herzinsuffizienz oder der anästhesiologischen Einteilung nach ASA (Tabelle 2). Chronisch obstruktive Lungenerkrankungen (COPD) lagen signifikant häufiger bei Männern vor, bei Frauen gab es keinen Fall einer COPD als Vorerkrankung.

Patienten	Gesamtheit	Frauen	Männer	p-Wert
Begleiterkrankungen				
Diabetes	14/ 96 (14,58 %)	8/ 61 (13,11 %)	6/ 35 (17,14 %)	1,000
Bluthochdruck	64/ 96 (66,67 %)	37/ 61 (60,66 %)	27/ 35 (77,14 %)	0,076
COPD	4/ 96 (4,17 %)	0/ 61	4/ 35 (11,43 %)	0,015
Herzinsuffizienz	9/ 96 (9,38 %)	3/ 61 (4,92 %)	4/ 35 (11,43 %)	0,217
ASA				
I	5/ 85 (5,88 %)	4/ 54 (7,41 %)	1/ 31 (3,23 %)	0,733
II	48/ 85 (56,47 %)	30/ 54 (55,56 %)	18/ 31 (58,06 %)	
III	32/ 85 (37,65 %)	20/ 54 (37,04 %)	12/ 31 (38,71 %)	

Tabelle 2: Begleiterkrankungen der eingeschlossenen Patient:innen nach Geschlecht. p-Werte wurden mittels Chi-Quadrat-Test ermittelt. Statistisch signifikante p-Werte sind fett markiert.

3.2. Radiologische Parameter

In Tabelle 3 sind die präoperativ anhand lateraler Röntgenaufnahmen gemessenen Werte der segmentalen und Gesamtlordose dargestellt. Aufgrund vorhandener Normalverteilung wurde auf signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen mittels t-Test bei unabhängigen Stichproben getestet. Frauen zeigten im Vergleich zu Männern eine signifikant höhere Gesamtlordose der LWS (43,61° vs. 37,28°; $p < 0,003$). Auch die segmentale Lordose war bei Frauen höher als bei Männern, jedoch war dieser Unterschied nicht statistisch signifikant (20,24° vs. 18,61°; $p = 0,294$). Die Lordose im Bereich L4/5 war bei Männern höher, aber ebenfalls nicht signifikant (6,50° vs. 6,90°; $p = 0,667$).

	Geschlecht	Anzahl	Mittelwert mit Standardabweichung	p-Wert
Lordose insgesamt (°)	F	61	43,61 (± 10,15)	0,003
	M	35	37,28 (± 8,80)	
Segmentale Lordose (°)	F	61	20,24 (± 7,70)	0,294
	M	35	18,61 (± 6,53)	
Lordose L4/5 (°)	F	58	6,50 (± 4,17)	0,667
	M	32	6,90 (± 4,24)	

Tabelle 3: Parameter des sagittalen Profils anhand Messung in lateralen Röntgenbildern der Lendenwirbelsäule. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung. Signifikante Unterschiede wurden mittels des t-Tests ermittelt und sind fett markiert.

	Gesamtheit (N= 96)	Frauen (N= 61)	Männer (N= 35)	p-Wert
Meyerding 1	72 (75,0 %)	40 (65,57 %)	32 (91,43 %)	0,018
Meyerding 2	23 (23,96 %)	20 (32,79 %)	3 (8,57 %)	
Meyerding 3	1 (1,0 %)	1 (1,6 %)	0	

Tabelle 4: Verteilung der Meyerding-Grade nach Geschlecht. Signifikante Unterschiede wurden mittels Mann-Whitney-U-Test ermittelt und sind fett markiert.

Bezüglich der Einteilung des Ausmaßes der Spondylolisthese nach Meyerding lagen bis auf eine Ausnahme mit Meyerding Grad 3 in unserer Studienkohorte ausschließlich Patient:innen mit Grad 1 und 2 nach Meyerding vor (Tabelle 4). Die Verteilung unterschied sich zwischen den Geschlechtern signifikant, wobei Spondylolisthesen Meyerding Grad 2 häufiger bei Frauen auftraten (32,79 % vs. 8,57 % p=0,018). Statistische Signifikanz wurde mittels Mann-Whitney-U-Test ermittelt.

Die Translation von LWK4 wurde in stehender Neutralposition sowie in Reklination und Inklination in mm gemessen, sowie Mittelwerte und Standardabweichung für beide Geschlechter bestimmt. Auf signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede wurde mittels t-Test untersucht.

	Anzahl (N)	Mittelwert mit Standardabweichung	p-Wert
Translation F M	61	7,53 (± 2,89)	0,097
	35	6,50 (± 2,91)	
Translation Reklination F M	53	7,91 (± 3,51)	0,053
	31	6,45 (± 2,85)	
Translation Inklinasion F M	54	9,55 (± 3,89)	0,474
	31	8,94 (± 3,56)	

Tabelle 5: Translationsausmaß nach Geschlecht mit Mittelwert und Standardabweichung. Signifikante Unterschiede wurden mittels t-Test ermittelt und sind fett markiert.

Frauen zeigten ein höheres Translationsausmaß in stehender Neutralposition (7,53 mm vs. 6,50 mm; $p=0,097$), in Inklinasion (9,55 mm vs. 8,94 mm, $p=0,474$) und in Reklination (7,91 mm vs. 6,45 mm, $p=0,053$). Der Unterschied war für alle drei Messungen jedoch nicht signifikant.

3.3. Veränderung der Muskelzusammensetzung in Bezug auf das Geschlecht

	Gesamtheit (96)	Frauen (61)	Männer (35)	p-Wert
MU CSA (cm ² /m ²)	8,88 (± 2,29)	8,88 (±2,37)	8,91 (±2,16)	0,947
MU fCSA (cm ² /m ²)	5,94 (± 2,14)	5,80 (±2,24)	6,19 (±1,96)	0,387
MU FAT (cm ² /m ²)	2,94 (±1,53)	3,08 (±1,65)	2,71 (±1,29)	0,267
MU FI (%)	33,40 (±15,16)	35,03 (±15,87)	30,57 (±13,60)	0,168
ES CSA (cm ² /m ²)	13,71 (±4,10)	14,27 (±4,36)	12,74 (±3,46)	0,077
ES fCSA (cm ² /m ²)	11,46 (±3,85)	11,82 (±4,02)	10,84 (±3,50)	0,228
ES FAT (cm ² /m ²)	2,25 (±1,59)	2,45 (±1,70)	1,90 (±1,32)	0,102
ES FI (%)	16,98 (±12,49)	17,75 (±12,89)	15,63 (±11,82)	0,425
PS CSA (cm ² /m ²)	10,60 (±3,52)	9,61 (±3,18)	12,32 (±3,47)	< 0,001
PS fCSA (cm ² /m ²)	10,45 (±3,47)	9,50 (±3,12)	12,12 (±3,47)	< 0,001
PS FAT (cm ² /m ²)	0,15 (±0,33)	0,11 (±0,29)	0,20 (±0,39)	0,237
PS FI (%)	1,32 (±2,49)	1,17 (±2,95)	1,59 (±2,81)	0,433

Tabelle 6: Muskelzusammensetzung des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) im Vergleich von Frauen und Männern. Signifikante Unterschiede wurden mittels t-Test ermittelt und sind fett markiert. CSA cross-sectional area; fCSA functional cross-sectional area; FAT intramuscular fat area; FI Fettinfiltration.

In der Untersuchung der Muskelzusammensetzung zeigten sich signifikant geringere Werte für die CSA (9,61 vs. 12,32, $p < 0,001$) und fCSA (9,50 vs. 12,12, $p < 0,001$) des M. psoas in weiblichen Patientinnen verglichen mit männlichen Patienten. In der CSA und fCSA des M. multifidus und des M. erector spinae zeigten sich dagegen keine signifikanten Unterschiede. Ebenfalls bestanden keine signifikanten Unterschiede in der Fettinfiltration der untersuchten Muskeln. Auf statistische Signifikanz wurde mittels Mann-Whitney-U-Test untersucht.

3.4. Veränderung der Muskelzusammensetzung in Bezug auf BMI und Alter

Der Zusammenhang zwischen Muskelzusammensetzung und BMI, sowie Alter wurde jeweils mittels einer linearen Regressionsanalyse untersucht. Dabei zeigte sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der fCSA des M. psoas und dem BMI ($p = 0,0032$).

	Beta	Standardfehler	p-Wert
CSA MU	-0,214	0,784	0,557
FAT MU	0,279	1,927	0,649
FI MU	-0,412	0,185	0,478
fCSA ES	0,014	0,332	0,958
FAT ES	0,159	1,047	0,645
FI ES	-0,120	0,178	0,795
fCSA PS	0,324	0,207	0,032
FAT PS	-0,352	5,633	0,366
FI PS	0,490	0,763	0,216

Tabelle 7: Zusammenhang der Muskelparameter des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) mit dem Body-Mass-Index: Beta, Standardfehler und p-Wert wurden mittels linearer Regressionsanalyse ermittelt. Statistisch signifikante Werte sind fett markiert. CSA cross-sectional area; fCSA functional cross-sectional area; FAT intramuscular fat area; FI Fettinfiltration.

	Beta	Standardfehler	p-Wert
CSA MU	-0,176	1,407	0,578
FAT MU	-0,043	3,560	0,936
FI MU	0,382	0,344	0,458
fCSA ES	-0,050	0,634	0,835
FAT ES	-0,041	2,006	0,895
FI ES	0,214	0,340	0,609
fCSA PS	0,311	0,379	0,018
FAT PS	0,140	10,746	0,691
FI PS	-0,058	1,456	0,871

Tabelle 8: Zusammenhang der Muskelparameter des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) mit dem Alter: Beta, Standardfehler und p-Wert wurden mittels linearer Regressionsanalyse ermittelt. Statistisch signifikante Werte sind fett markiert. CSA cross-sectional area; fCSA functional cross-sectional area; FAT intramuscular fat area; FI Fettinfiltration.

3.5. Zusammenhang von Translation und Muskeldegeneration

Der Zusammenhang der LWK4-Translation und Muskelzusammensetzung, CSA und fCSA wurde mittels Pearson-Korrelation bei univariater Normalverteilung untersucht.

		FI MU (%)	FI ES (%)	FI PS (%)
Translation (mm)	R	0,119	-0,038	-0,146
	P	0,248	0,710	0,155

Tabelle 9: Korrelation der Fettinfiltration (FI) des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) mit der Translation von LWK4. Signifikante Unterschiede wurden mittels Pearson-Korrelation ermittelt.

Dabei zeigte sich keine signifikante Korrelation des Ausmaßes der LWK4-Translation mit der Fettinfiltration der Mm. multifidus, psoas und erector spinae.

		CSA MU	CSA ES	CSA PS
Translation (mm)	R	0,062	0,170	-0,057
	P	0,547	0,097	0,584

Tabelle 10: Korrelation der Querschnittfläche (CSA) des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) mit der Translation von LWK4. Signifikante Unterschiede wurden mittels Pearson-Korrelation ermittelt.

Es zeigte sich außerdem keine signifikante Korrelation des Grades der LWK4-Translation mit der CSA der Mm. multifidus, psoas und erector spinae (Tabelle 10).

		fCSA MU	fCSA ES	fCSA PS
Translation (mm)	R	-0,058	0,160	-0,046
	P	0,578	0,120	0,658

Tabelle 11: Korrelation der funktionellen Querschnittfläche (fCSA) des M. multifidus (MU), M. erector spinae (ES) und M. psoas (PS) mit der Translation von LWK4. Signifikante Unterschiede wurden mittels Pearson-Korrelation ermittelt.

Auch für die fCSA der Mm. multifidus, psoas und erector spinae bestand keine signifikante Korrelation des Grades der LWK4-Translation (Tabelle 11).

	Beta	Standardfehler	p-Wert
FI MU (%)	0,436	0,032	0,009
FI ES (%)	-0,298	0,037	0,061
FI PS (%)	-0,153	0,120	0,139

Tabelle 12: Regressionsanalyse mit dem Translationsausmaß von LWK4 als abhängige Variable. FI (Fettinfiltration); MU M. multifidus; ES M. erector spinae; PS M. psoas.

In der linearen Regressionsanalyse zum Zusammenhang zwischen Fettinfiltration und dem Ausmaß der Translation zeigte sich ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen der Fettinfiltration des M. multifidus und dem Ausmaß der LWK4-Translation ($b=0,436$, $p=0,009$), während dieser Zusammenhang für die Mm. erector spinae und psoas nicht bestand (Tabelle 12).

Den Einfluss von BMI, Alter und Geschlecht auf die LWK4-Translation wurde mittels einer einfachen linearen Regressionsanalyse untersucht. Es zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang (Tabelle 13).

	Beta	Standardfehler	p-Wert
BMI	-0,031	0,060	0,760
Alter	-0,098	0,028	0,315
Geschlecht	-0,183	0,570	0,057

Tabelle 13: Regressionsanalyse mit dem Translationsausmaß von LWK4 als abhängige Variable und BMI, Alter, Geschlecht als unabhängige Variablen.

3.6. Zusammenhang von Lordose und Muskeldegeneration

Zur Prüfung des Zusammenhangs der Gesamtlordose, segmentaler Lordose und Lordose L4/5 mit der Fettinfiltration der Mm. multifidus, erector spinae und psoas wurden ebenfalls lineare Regressionsanalysen durchgeführt (Tabellen 14-16). Dabei zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang in der einfachen linearen Regressionsanalyse zwischen der Gesamtlordose, segmentalen Lordose oder der Lordose im Bereich L4/5 und der Fettinfiltration des M.multifidus, M. erector spinae und M. psoas.

	Beta	Standardfehler	p-Wert
FI MU	0,255	0,109	0,123
FI ES	-0,129	0,131	0,427
FI PS	-0,042	0,427	0,688

Tabelle 14: Regressionsanalyse mit der Gesamtlordose als abhängige Variable. FI Fettinfiltration; MU M. multifidus; ES M. erector spinae; PS M. psoas.

	Beta	Standardfehler	p-Wert
FI MU	-0,016	0,077	0,921
FI ES	0,291	0,092	0,069
FI PS	-0,013	0,301	0,901

Tabelle 15: Regressionsanalyse mit der segmentalen Lordose als abhängige Variable. FI Fettinfiltration; MU M. multifidus; ES M. erector spinae; PS M. psoas.

	Beta	Standardfehler	p-Wert
FI MU	-0,113	0,048	0,506
FI ES	0,150	0,056	0,374
FI PS	0,057	0,179	0,601

Tabelle 16: Regressionsanalyse mit der Lordose L4/5 als abhängige Variable. FI Fettinfiltration; MU M. multifidus; ES M. erector spinae; PS M. psoas.

4. Diskussion

In der vorliegenden Promotionsarbeit wurde der Zusammenhang zwischen der Querschnittsfläche und der Fettinfiltration der paraspinalen Muskulatur und radiologischen sowie demographischen Parametern bei degenerativer Spondylolisthese des Segments L4/5 untersucht. Dabei zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Fettinfiltration des M. multifidus, aber nicht der Mm. erector spinae und psoas mit dem Ausmaß der Translation des LWK4.

Dies unterstützt die initiale Hypothese, dass ein Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der paraspinalen Muskulatur und dem Vorhandensein einer degenerativen Spondylolisthese besteht. Gleichzeitig zeigten sich trotz des höheren Ausprägungsgrads der Spondylolisthese in weiblichen Patient:innen kein Einfluss des Geschlechtes, des BMI oder des Alters auf das Ausmaß der Translation des LWK4.

Es zeigten sich keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Fettinfiltration des M. psoas, M. erector spinae und M. multifidus. Muskeldegeneration ist demnach geschlechtsunabhängig vorhanden. Die CSA und fCSA des M. psoas war bei Frauen dagegen signifikant geringer.

Das Ausmaß der Fettinfiltration des M. multifidus und des M. erector spinae zeigte keinen signifikanten Zusammenhang mit der gesamten oder segmentalen Lordose oder mit der Lordose im Bereich L4/5.

4.1. Einordnung der Ergebnisse in die Literatur

Den Einfluss muskulärer Degeneration auf Spondylolisthesen untersuchten Zhu et al. mittels eines biomechanischen 3D-Modells der Wirbelsäule und der autochthonen und oberflächlichen Rückenmuskulatur. Hier wurde eine stärkere Translation des LWK4 mit abnehmender Muskelkraft festgestellt (83).

Eine Untersuchung von Wang et al. diskutiert die Atrophie der paraspinalen Muskulatur, vor allem des M. multifidus, und Veränderungen in der Bandscheibe als Ursache für die Entstehung einer degenerativen lumbalen Spondylolisthese. Das Segment L4/5 war hierbei am häufigsten betroffen. Es wurde postuliert, dass eine verminderte Muskelkraft die segmentale Instabilität bedingt (84). Dabei zeigte sich, dass eine Atrophie des M. multifidus und verminderte Höhe im Bereich der anterioren Bandscheibe signifikant stärker in der

Studiengruppe mit Spondylolisthese ausgeprägt war als in der Kontrollgruppe. Auch wurde eine Hypertrophie des M. erector spinae festgestellt, was auf einen Kompensationsmechanismus bei segmentaler Instabilität und Atrophie des M. multifidus schließen lässt (84). Dies stimmt mit unseren Ergebnissen überein, die einen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der muskulären Degeneration des M. multifidus und der Translation des LWK4 zeigen.

Auch Li et al. untersuchten den Einfluss der paraspinalen Muskulatur auf die degenerative Spondylolisthese und Spinalkanalstenose verglichen mit gesunden Proband:innen. Hierbei waren ein erhöhtes Ausmaß an Verfettung des M. multifidus und des M. psoas sowie ein erhöhter BMI mit dem Vorhandensein einer degenerativen Spondylolisthese assoziiert, wohingegen eine erhöhte CSA als protektiv aufgeführt wurde. Die fehlende vermehrte Verfettung des M. erector spinae wurde hier ebenfalls durch kompensatorische Mehrbelastung des Muskels bei Degeneration des M. multifidus erklärt (85).

Eine Literaturübersichtsarbeit von Kalichman et al. kam zu dem Ergebnis, dass Degeneration im Sinne einer vermehrten Fettinfiltration des M. multifidus mit Schmerzen im unteren Rücken assoziiert ist und insbesondere im Bereich stärker ausgeprägter degenerativer spinaler Veränderungen auftritt (57). Für unsere Studiengruppe konnten wir aufgrund des retrospektiven Studiendesigns keinen Rückschluss ziehen, ob die Schmerzintensität mit höherer Fettinfiltration des M. multifidus und größerer Translation korrelierte, da keine standardisierte Erfassung des Schmerzstatus stattgefunden hatte. Da aber alle Patient:innen eine operative Therapie durchlaufen hatten, ist von persistierenden Schmerzen des unteren Rückens auszugehen.

Im Gegensatz zu der von Kalichman et al. gezeigten Korrelation zwischen einer erhöhten Fettinfiltration des M. multifidus und der Schmerzintensität, besteht zwischen der CSA der autochthonen Rückenmuskulatur und Schmerzen des unteren Rückens kein Zusammenhang. (86). Unsere Ergebnisse legen ebenfalls nahe, dass Schmerzen eher mit einer Verfettung des M. multifidus als mit Veränderungen der CSA zusammenhängen. Zwar wurde Schmerz präoperativ nicht systematisch erfasst und war damit keiner statistischen Analyse zugänglich, jedoch ist von persistierendem Rückenschmerz in unserer Kohorte auszugehen, da eine Indikation zur operativen Versorgung in der Regel bei unter konservativer Therapie nicht ausreichend gebessertem Schmerzstatus besteht.

Auch Bailey et al. untersuchten Einflussfaktoren für die Entstehung chronischer Schmerzen des unteren Rückens. Hierbei lag der Fokus auf dem Zusammenspiel von degenerativen Veränderungen der Deckplatten und der angrenzenden paraspinalen Muskulatur. Chronische Schmerzen zeigten sich im Bereich L4/5 bei Deckplattenschaden und größerer Fettinfiltration der paraspinalen Muskulatur. Wenn die Muskulatur keine Zeichen der Verfettung zeigte, konnte vom Grad des Wirbeldeckplattenschadens kein Zusammenhang zu chronischen Schmerzen dargestellt werden (87). Hier wird die Bedeutung des Muskelstatus für die Schmerzentstehung und das Zusammenspiel von aktiven und passiven Strukturen der Wirbelsäule ersichtlich. Eine degenerative Veränderung der Wirbelsäule kann bei fehlender Atrophie der paraspinalen Muskulatur symptomfrei bleiben, wobei die Übertragung dieser Ergebnisse auf andere degenerative spinale Veränderungen noch aussteht. Der potenzielle Einfluss der paraspinalen Muskulatur auf die Entstehung von chronischen Schmerzen soll hier jedoch hervorgehoben werden.

In der vorliegenden Promotionsarbeit wurden mehr Frauen als Männer eingeschlossen (64,8% vs. 35,2%). Dies spiegelt epidemiologische Daten wider, anhand derer eine erhöhte Prävalenz degenerativer Spondylolisthesen bei Frauen nachgewiesen wurde. Dabei wird von einem Zusammenhang mit der Menopause und hormonellen Veränderungen bei Frauen ausgegangen, da die degenerative Spondylolisthese vor dem 50. Lebensjahr kaum vorkommt und Frauen verglichen mit Männern des gleichen Alters häufiger betroffen sind (21). In diesem Zusammenhang wurde außerdem gezeigt, dass eine hormonelle Ersatztherapie zu Beginn der Menopause einen positiven Einfluss auf die Skelettmuskulatur haben kann (88). So wurde eine zunehmende Muskeldichte unter Hormonersatztherapie mit oder ohne zusätzliches Training gezeigt. Dies lässt vermuten, dass die auf hormonellen Veränderungen im Rahmen der Menopause beruhende muskuläre Degeneration im Sinne einer abnehmenden Muskeldichte durch Verfettung zu einem vermehrten Wirbelgleiten bei Frauen beiträgt. So lässt sich neben dem gehäuften Auftreten der degenerativen Spondylolisthese bei Frauen auch der Zusammenhang der Verfettung des M. multifidus mit dem Translationsausmaß erklären. Dies könnte ein vermehrtes postmenopausales Wirbelgleiten durch abnehmende muskuläre Stabilisierung der jeweiligen Segmente erklären. Somit wären postmenopausale Frauen häufiger von einer Spondylolisthese betroffen.

Mit einem mittleren Alter von 68,5 Jahren bei Frauen und 71,1 Jahren bei Männern waren in unserer Studie tendenziell Frauen auch in jüngeren Jahren häufiger von einer degenerativen Spondylolisthese betroffen.

Weder für den M. multifidus noch für den M. erector spinae waren in unserem Patientenkollektiv signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede zu finden.

Die Gesamtlordose in unserer Studiengruppe war bei Frauen signifikant höher als bei Männern, wohingegen es keine Unterschiede in der segmentalen Lordose und der Lordose im Bereich L4/5 gab.

Sparrey et al. untersuchten die lumbale Lordose unter evolutionären, mechanischen und biologischen Gesichtspunkten und nennen drei Hauptunterschiede im Aufbau der Wirbelsäule zwischen den Geschlechtern. Bei Frauen ist die Lordoseentstehung durch eine vermehrte anterior Kompression der Wirbelkörper stärker ausgeprägt als bei Männern. Auch sind die Facettengelenke von Frauen in Relation zum Wirbelkörper größer als bei Männern, mehr in koronale Richtung ausgerichtet und weisen einen größeren Abstand zueinander auf (89). Für BMI und Gewichtszunahme gibt es dagegen keinen nachweislichen Effekt auf die lumbale Lordose (90).

Die Ergebnisse einer Metaanalyse von Arshad et al. zeigten eine Abnahme der lumbalen Lordose und des Bewegungsumfangs durch degenerative Veränderungen mit steigendem Lebensalter (91).

Zur Erkennung der segmentalen Instabilität ist geschlechtsunabhängig die Anfertigung von Röntgenaufnahmen im Stehen sowie in Inklination und Reklination der Goldstandard (92). Betrachtet man das Ausmaß der Translation, bestand in unserer Kohorte in stehender Neutralposition kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern. Allerdings zeigen unsere Daten, dass die Translation in Reklination tendenziell bei Frauen größer als bei Männern war. Dies könnte wiederum mit anatomischen, geschlechtsspezifischen Unterschieden oder einem weniger starren Bandapparat zusammenhängen. Hyperlaxizität und hormonelle Bindegewebsveränderungen bei Frauen als Ursache für vermehrtes Wirbelgleiten wurden in der Literatur beschrieben (35).

Auch bezüglich der Klassifikation nach Meyerding zeigten Frauen signifikant häufiger eine Spondylolisthese Meyerding Grad 2 im Vergleich zu Männern. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Literatur, dass bei Frauen häufiger ein stärker ausgeprägter Grad des Wirbelgleitens vorliegt (24). Da Frauen insgesamt kleinere Wirbelkörper als Männer aufweisen ist der absolute Unterschied in der Translation nicht signifikant größer. In der

Einteilung nach Meyerding ist die Translation bei Frauen aber signifikant größer als bei Männern.

Der Vergleich zwischen CSA, fCSA und Fettinfiltration bei Männern und Frauen zeigte eine signifikant größere CSA und fCSA des M. psoas bei Männern. Eine Studie von Thakar et al. kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass bei Frauen CSA und fCSA des M. psoas signifikant geringer als bei Männern war (93).

Auch Muellner et al. untersuchten den Einfluss von Alter und Geschlecht auf die Muskelzusammensetzung und fanden eine signifikant höhere CSA und fCSA des M. psoas bei Männern. Die Fettinfiltration des M. psoas war bei Frauen unterhalb des 60. Lebensjahres höher als bei Frauen über dem 70. Lebensjahr. Dies stand im Gegensatz zu M. multifidus und M. erector spinae, die mit steigendem Alter einen signifikant höheren Fettanteil bei Frauen aufweisen (94).

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass im Bereich L1 bis L5 mit steigendem Alter der CSA der paraspinalen Muskulatur abnimmt, wohingegen die Verfettung zunimmt (71). Es gab keinen signifikanten Zusammenhang von lumbaler Lordose und BMI in allen untersuchten Altersgruppen (10. bis 88. Lebensjahr). Aus diesen Ergebnissen wurde ein Index entwickelt, der die schnelle Beurteilung der Muskeldegeneration erleichtern soll. Dieser errechnet sich aus der Länge der Muskelbauchs zum Ansatz am jeweiligen Processus spinosus, korreliert mit der CSA und nimmt mit dem Alter ab (71).

4.2. Die Rolle des M. multifidus bezüglich spinaler Stabilität

Wie oben bereits dargestellt, wurde der Zusammenhang muskulärer Fettinfiltration und Rückenschmerzen von Kjaer et al. untersucht, um die Möglichkeit einer Schmerzreduktion durch Muskelaufbau aufzuzeigen. Dabei zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Fettinfiltration des M. multifidus und unteren Rückenschmerzen bei Erwachsenen (76).

Ebenso kam eine Übersichtsarbeit von Seyedhoseeinpoor et al. zu dem Ergebnis, dass Schmerzen des unteren Rückens mit einer höheren Fettinfiltration und Verkleinerung des M. multifidus einhergehen (95).

Dabei wird postuliert, dass Schmerzen durch Muskelatrophie und damit assoziierten Veränderungen in der Biomechanik der Wirbelsäule entstehen. Daher spielt vor allem die Atrophie des M. multifidus eine entscheidende Rolle, da der M. multifidus maßgebend an der Stabilisierung der Wirbelsäule beteiligt ist (96).

Auch eine Übersichtsarbeit von Ranger et al. konnte zeigen, dass eine vermehrte Fettinfiltration und Abnahme der CSA des M. multifidus mit Schmerzen des unteren Rückens von einer Dauer bis zu zwölf Monaten korreliert. Über einen längeren Zeitraum als zwölf Monate konnte keine ausreichende Evidenz für diesen Zusammenhang gezeigt werden. Ebenso wurde für alle weiteren paraspinalen Muskelgruppen kein Zusammenhang von Muskelatrophie und Schmerzen gefunden (97).

Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe von Patient:innen ohne chronische Schmerzen zeigten Proben des M. multifidus von Patient:innen, die sich aufgrund chronischer Schmerzen des unteren Rückens durch degenerative Veränderungen einer Operation unterzogen hatten, eine verstärkte muskuläre Degeneration, Entzündung und verminderte Vaskularisierung (98).

Der M. multifidus ist maßgebend an der spinalen Stabilität beteiligt. Um die Ursache für seine stärkere Anfälligkeit für Verfettung herauszufinden, untersuchten Agha et al. histologisch Muskelproben von Patient:innen mit Bandscheibenvorfall und Degeneration des M. multifidus, die sich einer Dekompressionsoperation unterzogen hatten. Dabei wurden Proben des M. multifidus und Proben der Oberschenkelbeugemuskulatur histologisch und genetisch untersucht. In den Proben des M. multifidus wurde eine Veränderung in Muskelstammzellen (Satellitenzellen) und fibro-adipogenen Vorläuferzellen zugunsten der Zunahme von Fettzellen von deren Vorläuferzellen gefunden, was die Neigung zur Verfettung erklären und vermehrte Atrophie bedingen könnte. Im Gegensatz dazu bestanden diese Veränderungen beispielsweise nicht in der Oberschenkelbeugemuskulatur. Fibro-adipogene Vorläuferzellen des M. multifidus wiesen einen höheren Anteil an adipogener Genexpression auf, als in der Oberschenkelmuskulatur (99).

Auch die Zusammensetzung der Muskelfasertypen ist in diesem Zusammenhang von Relevanz. Der M. multifidus besteht zu einem größeren Anteil aus Typ-1-Muskelfasern im Vergleich zum M. erector spinae, der maßgebend an der Mobilisierung der Wirbelsäule beteiligt ist (100).

Die langsamen Typ-1-Muskelfasern sind für ausdauernde Aktivität mit hohem Anteil an Mitochondrien und oxidativem Stoffwechsel verantwortlich, aber auch anfälliger für immobilisationsbedingten Veränderungen und damit einhergehenden Schmerzen. Der Verlust an Muskelkraft durch Immobilisation ist in den ersten sieben Tagen der Inaktivität am

größten. Hier findet nicht nur eine Reduktion der mitochondrialen Aktivität und des Faserdurchmessers, sondern auch ein Faserverlust statt, zugunsten der Zunahme an Bindegewebe. Die Atrophie kann rückgängig gemacht werden, wobei dieser Prozess wesentlich länger dauert als die Degeneration im Rahmen der Inaktivität (61). Es wird daher deutlich, wie essenziell das Vermeiden von Inaktivität für den Muskelstatus ist. Dies sollte im Therapieregime von Rückenschmerzen eine noch größere Rolle spielen.

Altersbedingte muskuläre Veränderungen führen überwiegend zu Sarkopenie, einer Reduktion von Größe und Anzahl der Muskelfasern, wobei vor allem schnelle Typ-II-Fasern betroffen sind (57). Auch findet im Rahmen des Alterns eine Umwandlung der Muskelstammzellen statt, sodass diese in Fettzellen differenzieren und eine Verfettung der Muskelfasern bedingen. Dabei spielen verschiedenen mitochondriale und molekulare Wirkungsketten eine entscheidende Rolle (72). Kommt es zusätzlich zur altersbedingten Verfettung zu einer Inaktivität, findet eine noch stärker ausgeprägte Verfettung der paraspinalen Muskulatur statt. Beide Faktoren führen also zu Verfettung, Instabilität und Schmerzen. Besonders bei älteren Patient:innen kann das Aktivitätslevel also maßgebend der Atrophie entgegenwirken. Hier gilt es daher, in Zukunft weitere klinische Untersuchungen über die Wirksamkeit von Muskelaufbau im Bereich der Wirbelsäule im Alter durchzuführen.

Eine Untersuchung von Hides et al. zeigte, dass auch bei gesunden professionellen Sportler:innen mit gutem Trainingszustand Schmerzen des unteren Rückens auftreten, wobei auch diese mit einer Atrophie des M. multifidus assoziiert waren. Durch gezieltes Training und Muskelaufbau des M. multifidus mit Zunahme des CSA konnte eine Schmerzreduktion von durchschnittlich 50% erreicht werden (101). Dies verdeutlicht die Relevanz von therapeutischen Möglichkeiten, durch gezieltes Training und Muskelaufbau eine signifikante Schmerzreduktion erreichen zu können. Hier könnten dann durch frühzeitige Intervention bei Vorliegen einer Spondylolisthese im Verlauf Operationen vermieden werden. Auch wird dadurch deutlich, dass auch in jungem Alter gezieltes Training Schmerzen des unteren Rückens deutlich reduzieren kann. Dies sollte als Ansatzpunkt zur Gesundheitsförderung der Bevölkerung betrachtet werden, durch Prävention Rückenschmerzen gezielt vermindern zu können.

Eine Atrophie der paraspinalen Muskulatur kann sich durch abnehmenden Muskelfaserdurchmesser und Zunahme der Fettinfiltration präsentieren. Auch unsere Daten

zeigten eine vermehrte Fettinfiltration des M. multifidus als Zeichen der muskulären Degeneration zu betrachten ist. Die Fettinfiltration korrelierte signifikant mit dem Ausmaß der Translation. Es ist anzunehmen, dass durch ungenügende Stabilisierung durch den Muskel die Instabilität im Rahmen der Spondylolisthese begünstigt wird. Eine Studie von Wang et al. zeigte, dass bei Patient:innen mit degenerativer Spondylolisthese eine verminderte anteriore Bandscheibenhöhe und vermehrte Atrophie des M. multifidus vorlag (84). In welcher zeitlichen Reihenfolge die Veränderungen auftreten, wurde nicht untersucht. In der klinischen Behandlung betroffener Patient:innen ist jedoch die Frage, in welcher Abfolge Instabilität und Muskelatrophie entstehen, weniger relevant. Bei Vorhandensein einer degenerativen Spondylolisthese sollte in jedem Fall der Fokus auf einem gezielten Muskelaufbau liegen, um Rückenschmerzen vorzubeugen. Inwiefern eine solche spezifische Therapie mit Muskelaufbau des M. multifidus bei degenerativer Spondylolisthese und Fettinfiltration des M. multifidus zu Schmerzreduktion führt, bleibt in klinischen Untersuchungen zu eruieren ebenso wie die Frage, ob Verfettung und Altern der Muskulatur rückgängig gemacht werden können. Hier gilt es, die Einflüsse von Alter und krankheitsbedingter Veränderungen auf Satellitenzellen zu untersuchen, um ein besseres Verständnis zu erreichen und therapeutische Ansatzpunkte zu finden. Eine Untersuchung von Sousa-Victor et al. kam zu dem Ergebnis, dass in vitro eine Verjüngung von gealterten Satellitenzellen durch verschiedene biochemische oder genetische Veränderungen von Signaltransduktionswegen, sowie Regulation extrinsischer Einflüsse stattfinden kann. Auch durch einen veränderten Lebensstil hinsichtlich Ernährung und Training, der auf den Zellmetabolismus wirkt, konnte bei Mäusen eine vermehrte Aktivität der Satelliten erreicht werden (102).

4.3. Postoperatives Ergebnis und Muskelstatus

Auch die Betrachtung des Muskelstatus vor einer Operation gewinnt zunehmend an Bedeutung. Muellner et al. untersuchten beispielsweise die paraspinale Muskulatur von Patient:innen mit sagittalem spinalen Malalignment, die eine operative lumbale Fusion erhalten hatten. Im Vergleich zu Patient:innen ohne sagittale Fehlstellung zeigte sich eine vermehrte Fettinfiltration der paraspinalen Muskulatur. Die Fettinfiltration der paraspinalen Muskulatur konnte sogar eine Vorhersage über die postoperative sagittale Fehlstellung treffen (103).

Inwiefern Veränderungen der paraspinalen Muskulatur den Operationserfolg beeinflussen, wurde auch von Han et al. in einer Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2023, die zehn Studien

verglichen, untersucht. Ziel war, die Assoziation des Muskelstatus der Mm. multifidus, erector spinae und psoas mit postoperativen Schmerzen, ODI und Revisionsoperationen zu analysieren. Ein höheres Ausmaß an präoperativer Fettinfiltration des M. multifidus korrelierte mit einem höheren ODI Score postoperativ, also einer stärkeren Einschränkung durch Schmerzen des unteren Rückens. Auch persistierende postoperative Schmerzen des unteren Rückens konnten durch eine höhere präoperative Fettinfiltration des M. multifidus vorhergesagt werden. Persistierende Schmerzen bei ausgeprägter präoperativer Fettinfiltration und Abnahme der CSA des M. multifidus wurden auch für degenerative Spondylolisthesen nach Fusionsoperation festgestellt, wobei hier limitierend erwähnt werden muss, dass dabei nur eine Studie mit degenerativer Spondylolisthese eingeschlossen wurde. Die Fettinfiltration des M. erector spinae und M. psoas erlaubte dagegen keine Vorhersage bezüglich postoperativer Schmerzen und des Funktionsstatus. Für die Vorhersagbarkeit einer nötigen Revisionsoperation wurden widersprüchliche Daten bezüglich der Verfettung von M. multifidus und M. erector spinae eruiert, sodass hier keine finale Aussage getroffen werden kann (58).

Hier wird also deutlich, dass die präoperative Beurteilung der paraspinalen Muskulatur, vor allem des M. multifidus, eine Vorhersage über den Operationserfolg hinsichtlich der patient-reported outcomes erlaubt. Bei einem höheren Grad der Muskelverfettung des M. multifidus ist demnach postoperativ von persistierenden Schmerzen und einem höheren Grad der Behinderung auszugehen. Unter Umständen kann, sofern die Operation primär aufgrund der Rückenschmerzen und nicht beispielsweise aufgrund eines neurologischen Defizits durchgeführt wird, dann auch die Entscheidung gegen eine Operation getroffen werden, da in der klinischen Entscheidungsfindung immer der Nutzen gegenüber dem Risiko einer Operation überwiegen sollte. Die präoperative Beurteilung des M. multifidus kann also in der Entscheidung bezüglich der Notwendigkeit einer operativen Versorgung unterstützen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund von Bedeutung, dass die Messung des Fettgehalts des M. multifidus in den bereits standardmäßig präoperativ durchzuführenden MRT-Aufnahmen erfolgt und somit keine zusätzliche Diagnostik notwendig ist.

4.4. Prähabilitation

Aufgrund des maßgeblichen Einflusses der paraspinalen Muskulatur auf das Operationsergebnis scheint ihre Konditionierung nicht nur im Falle einer Entscheidung gegen eine Operation zielführend, sondern muss auch perioperativ berücksichtigt werden. Dies spielt

im Rahmen der in verschiedenen chirurgischen Disziplinen zunehmend eingeführten „Prähabilitation“ eine führende Rolle.

Nielsen et al. zeigten, dass ein zwei Monate vor Wirbelsäulenoperation begonnenes intensiviertes Rückentrainingsprogramm und optimierte Schmerztherapie zu einem kürzeren Krankenhausaufenthalt und einer schnelleren Rehabilitation postoperativ sowie zu einer größeren Zufriedenheit führten. Es gab keinen Unterschied bezüglich Komplikationen oder postoperativen Schmerzen. Zum Zeitpunkt der Operation zeigte die Gruppe nach intensivierten Maßnahmen einen verbesserten Funktionsstatus (104). Die Autor:innen schlussfolgern anhand dieser Ergebnisse, dass durch Training der Rückenmuskulatur ein objektivierbares besseres funktionelles Ergebnis nach Operation erreicht werden kann.

Eine Studie von Lindbäck et al. hatte zum Ziel herauszufinden, ob mittels präoperativer Physiotherapie bei Patient:innen zwischen dem 25. und 80. Lebensjahr mit degenerativen lumbalen Wirbelsäulenerkrankungen (Bandscheibenvorfall, Spinalkanalstenose, Spondylolisthese, degenerative Bandscheibenveränderung) eine Verbesserung von Funktion, Schmerzen und Gesundheit postoperativ und über einen Zeitraum von bis zu zwei Jahren erreicht werden kann. Die Interventionsgruppe erhielt zwei Mal wöchentlich Physiotherapie, die aus speziellen Übungen, Mobilisation, speziellen Übungen zur Bewegungskontrolle bei Schmerzen des unteren Rückens und Traktion bestand. Zusätzlich wurde ein individuelles Trainingsprogramm erstellt. Die Kontrollgruppe erhielt eine standardisierte Operationsaufklärung, postoperative Rehabilitationsmaßnahmen und die Empfehlung zu körperlicher Aktivität (105). Das primäre Ergebnis wurde durch Erhebung des ODI festgelegt, als sekundäre Ergebnisse galten Schmerzintensität (mittels visueller Analogskala), Angst, Depression, Selbstwirksamkeit, Angst mit Vermeidung und körperliche Aktivität. Es zeigten sich präoperativ für alle erhobenen Parameter Verbesserungen nach Physiotherapie und auch postoperativ zeigte die Interventionsgruppe höhere Aktivitätslevel (106). Somit wird deutlich, wie weitreichend die Effekte präoperativer Physiotherapie sind, da nicht nur eine physische sondern auch psychische Verbesserung des Gesundheitszustands eintreten kann. Da bei Vorhandensein von Rückenschmerzen Komorbiditäten wie Angst und Depression häufig sind, ist der positive Effekt von Physiotherapie in dieser Hinsicht besonders hervorzuheben. Inwiefern das Langzeitergebnis ein Jahr nach Operation positiv beeinflusst wird, wurde von Fors et al. in den gleichen Kohorten untersucht. Es zeigte sich, dass die Gehfähigkeit und Kraft der unteren Extremität in der Gruppe mit präoperativer Physiotherapie deutlich besser

ausfielen, obwohl keine direkte Dosis-Wirkungs-Abhängigkeit bestand. Das postoperative Aktivitätslevel war ebenfalls höher (107). Analog zu diesen Ergebnissen konnte von Marchand et al. auch für die operative Therapie lumbaler Spinalkanalstenosen und sechswöchige präoperative Trainingsmaßnahmen eine signifikante klinische Verbesserung und Steigerung von körperlichen Fähigkeiten ab drei Monaten postoperativ festgestellt werden (108). Eine Literaturübersichtsarbeit von Bogaert et al. von 2022 kam ebenfalls zu dem Schluss, dass Training und multimodale Therapie, die aus speziellen Übungen in Verbindung mit kognitiver Verhaltenstherapie besteht, bis zu einem halben Jahr nach Fusionsoperation eine Verminderung der körperlichen Einschränkung und schmerzassoziierter Angst zeigen (109).

Zusätzlich zeigten Chan et al., dass übergewichtige Patient:innen mit einem BMI $> 30 \text{ kg/m}^2$ von einer operativen Therapie bei degenerativer lumbaler Spondylolisthese zwar profitieren, aber verglichen zu Patient:innen mit einem BMI $< 30 \text{ kg/m}^2$ postoperativ mehr Schmerzen in den Unterschenkeln und eine geringere Verbesserung der Lebensqualität erfahren. Schmerzen des unteren Rückens und Zufriedenheit ein Jahr postoperativ war dagegen in beiden Gruppen gleich hoch (110). Agarwal et al. untersuchten ebenfalls den Einfluss des BMI auf das Operationsergebnis bei lumbaler Spondylolisthese, schlossen jedoch ausschließlich Patient:innen mit einer Spondylolisthese Grad 1 nach Meyerding ein. Für einen präoperativen BMI $\leq 37,5 \text{ kg/m}^2$ konnte ein besseres postoperatives Ergebnis mit weniger Schmerzen, weniger Einschränkungen, größerer Zufriedenheit und verbesserter Lebensqualität eruiert werden (111). Folglich kann präoperativ eine Gewichtssekung bei Fettleibigkeit gefordert werden oder für Patient:innen mit einem BMI $> 37,5 \text{ kg/m}^2$ elektive operative Maßnahmen bei Spondylolisthese Grad 1 zurückhaltender geplant werden. Allerdings wurden hier nur Patient:innen mit einem BMI $> 30 \text{ kg/m}^2$ eingeschlossen, was durch fehlenden Vergleich mit normalgewichtigen Patient:innen keinen validen Grenzwert liefern kann.

Insgesamt wird also deutlich, dass es zwar Hinweise auf einen positiven Effekt einer Prähabilitation gibt, jedoch weiterhin Forschungsbedarf bezüglich ihres Nutzens besteht. Zusammen mit postoperativer Rehabilitation könnte so das optimale Ergebnis in Bezug auf die Lebensqualität der Patient:innen erreicht werden. Dies würde auch auf gesundheitsökonomischer Ebene einen positiven Effekt zeigen, da weniger Arbeitsunfähigkeit, ärztliche Versorgung, stationäre Behandlungen und Frühberentung erwartet werden könnten. Auch die Förderung von Rückengesundheit durch spezifisches

Training könnte schon vor Vorliegen einer degenerativen Erkrankung der Wirbelsäule und einer Operationsindikation einen positiven Effekt auf die Gesundheit der Gesamtbevölkerung haben.

Die in der vorliegenden Promotionsarbeit erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass der Grad der Translation im Rahmen einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 signifikant mit dem Ausmaß der Fettinfiltration des M. multifidus korreliert. Die oben dargestellte Literatur zeigt zudem einen Zusammenhang muskulärer Fettinfiltration mit dem Auftreten von Rückenschmerzen (58). Die Möglichkeit, im Rahmen der primären konservativen Therapie unterer Rückenschmerzen bei degenerativer Spondylolisthese durch Muskelaufbau und weiteren physiotherapeutischen Maßnahmen eine Beschwerdebesserung zu erreichen gewinnt an Relevanz. Es wird zudem deutlich, dass durch präoperativ begonnene gezielte muskuläre Trainingsmaßnahmen auch postoperativ bessere Ergebnisse erwartet werden können. Der Fokus könnte sich daher in Zukunft auf einen gezielten Muskelaufbau der paraspinalen Muskulatur verlagern, was zu einer Reduktion der Anzahl an Operationen sowie im Falle der Notwendigkeit eines operativen Eingriffs zu einem größeren Operationserfolg führen könnte.

5. Limitationen

In der Betrachtung der durchgeführten Promotionsarbeit müssen einige Limitationen diskutiert werden. Zunächst ist die retrospektive Datenerhebung zu nennen, die einen Selektionsbias bedingt. Weiterhin konnte aufgrund des retrospektiven Studiendesigns keine Ermittlung des Zusammenhangs von subjektiver Schmerzintensität und Muskeldegeneration bei Spondylolisthese aufgrund fehlender standardisierter Erhebung der Schmerzintensität stattfinden. Auch weitere klinische Patientendaten wie der Bewegungsumfang vor und nach Operation waren aufgrund der retrospektiven Datenerhebung nicht standardisiert auswertbar. Aufgrund des Studiendesigns als Querschnittsstudie kann außerdem keine Aussage hinsichtlich der Kausalität muskulärer Veränderungen im Zusammenhang mit der Translation des LWK4 getroffen werden. Weiterhin wäre die Beurteilung der Muskulatur im Verlauf von Bedeutung, um die Degeneration vor und nach konservativen Maßnahmen sowie in der postoperativen Rehabilitationsphase zu beurteilen.

Zusätzlich muss angeführt werden, dass die Patientenkohorte ausschließlich aus operativ versorgten Patient:innen bestand. Konservativ behandelte Patient:innen wurden nicht eingeschlossen. Ein Vergleich der konservativ und operativ versorgten Patientengruppen kann damit nicht gezogen werden.

Schließlich war die Durchführung der Bildgebung nicht standardisiert. Jedoch besteht bis heute kein standardisiertes Vorgehen zur MRT-Untersuchung der Wirbelsäule, was zur Akquirierung einer Vielzahl von verschiedenen Sequenzen führt. Auch die Anwendung einer einheitlichen Feldstärke für die Wirbelsäulenbildgebung könnte zukünftig die Vergleichbarkeit verbessern.

6. Ausblick

Unsere Ergebnisse zeigen einen signifikanten Zusammenhang der Fettinfiltration des M. multifidus mit dem Grad der Translation des LWK4 bei Patient:innen mit degenerativer Spondylolisthese L4/5, die sich einer Operation unterzogen hatten.

Die Degeneration des M. multifidus äußert sich als vermehrte Fettinfiltration. Dabei ist eine Korrelation mit Schmerzen aus der Literatur bekannt (58).

Die Forderung der präoperativen Beurteilung des Muskelstatus der paraspinalen Muskulatur bei degenerativer Spondylolisthese wird durch unsere Ergebnisse unterstützt. Die Beurteilung des Muskelstatus wird in der Therapie spinaler Erkrankungen zukünftig sowohl im Rahmen der konservativen Therapie als auch perioperativ für Prä- bzw. Rehabilitationskonzepte an Bedeutung gewinnen. Inwiefern ein gezielter Muskelaufbau des M. multifidus das Voranschreiten einer degenerativen Spondylolisthese aufhalten oder das operative Ergebnis verbessern kann, bleibt jedoch in prospektiven Interventionsstudien zu untersuchen. Ebenso bleibt die Frage, ob die Muskeldegeneration eine Instabilität der Wirbelsäule auslöst, welche dann wiederum ein Wirbelgleiten begünstigt oder aggraviert, oder ob ein vorliegendes Wirbelgleiten zu Instabilität und Muskeldegeneration führt, offen.

Basierend auf den hier gezeigten Ergebnissen sowie der bestehenden Literatur sollte in Zukunft die Beurteilung des paraspinalen Muskelstatus anhand präoperativer MRT-Bildgebung in der Behandlung degenerativer Spondylolisthesen an Bedeutung gewinnen. Bis heute wird dies im klinischen Alltag vernachlässigt. Hier könnte zukünftig dem Operateur/der Operateurin aber eine Entscheidungshilfe bezüglich Operationsindikation und Vorhersage des Operationsergebnisses gegeben werden.

Die bestmögliche, individuell angepasste Therapie für Patient:innen mit degenerativer Spondylolisthese könnte in Zukunft auch mit Anwendung von künstlicher Intelligenz festgelegt werden. Hier spielt die automatisierte Auswertung von radiologischen Untersuchungen eine herausragende Rolle. Außerdem könnten alle klinischen Parameter in Zusammenschau mit bildgebenden Parametern betrachtet werden und basierend auf groß angelegten multizentrischen Datenbanken ausgewertet werden. Dies geht dem Wunsch einer evidenzbasierten, optimierten und individualisierten Medizin mit bestmöglicher Versorgung der Patient:innen nach. Auch aus gesundheitsökonomischer Sicht könnten dadurch optimierte Abläufe geschaffen werden, die das durch alternde Gesellschaft immer stärker belastete Gesundheitssystem stützen.

7. Zusammenfassung

Der Zusammenhang von Veränderungen der paraspinalen Muskulatur mit der Translation des LWK4 wurde bei Patient:innen, die aufgrund einer degenerativen Spondylolisthese L4/5 eine lumbale Fusionsoperation durchlaufen hatten, untersucht. Daraus ergab sich eine signifikante Korrelation der Fettinfiltration des M. multifidus mit dem Ausmaß der Translation. Bei Vorhandensein einer stärkeren Muskeldegeneration ist also ein höheres Ausmaß der Translation zu erwarten. Die Translation zeigte dagegen keine Abhängigkeit mit BMI, Alter und Geschlecht.

Die Ergebnisse betonen die Rolle der paraspinalen Muskulatur bei degenerativer Spondylolisthese. Es ist von einer gegenseitigen Beeinflussung der passiven Strukturen der Wirbelsäule und den aktiven paraspinalen Muskeln auszugehen.

In Zukunft könnten gezielte Diagnostik und präoperatives Training der paraspinalen Muskulatur das Gesamtergebnis sowohl im Rahmen der konservativen als auch der operativen Therapie degenerativer Spondylolisthesen verbessern. So könnten auch Operationen vermieden werden und ein konservatives Therapieregime bestärkt werden. Hierfür bedarf es weiterer Forschung im Sinne prospektiver Untersuchungen, um die bestmögliche patientenspezifische Therapie zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

1. Von Der Lippe E, Krause L, Prost M, Wengler A, Leddin J, Müller A, Zeisler M-L, Anton A, Rommel A. Prävalenz von Rücken- und Nackenschmerzen in Deutschland. Ergebnisse der Krankheitslast-Studie BURDEN 2020. 10. März 2021 [zitiert 17. August 2023]; Verfügbar unter: <https://edoc.rki.de/handle/176904/7893>. Aufgerufen am 20.08.2023
2. Vincent K, Tracey I. Hormones and their Interaction with the Pain Experience. *Rev Pain*. Dezember 2008;2(2):20–4.
3. Raspe HH. Rückenschmerzen. Berlin: Robert-Koch-Institut; 2012. 31 S. (Gesundheitsberichterstattung des Bundes). Verfügbar unter <https://edoc.rki.de/bitstream/handle/176904/3239/28GjJzLHKNM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Aufgerufen am 20.08.2023
4. Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, Louw Q, Ferreira ML, Genevay S, Hoy D, Karppinen J, Pransky G, Sieper J, Smeets R, Underwood M. What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet Lond Engl*. 9. Juni 2018;391(10137):2356–67.
5. Meyer M, Wenzel J, Schenkel A. Krankheitsbedingte Fehlzeiten in der deutschen Wirtschaft im Jahr 2017. In: Badura B, Ducki A, Schröder H, Klose J, Meyer M, Herausgeber. Fehlzeiten-Report 2018 [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018 [zitiert 17. August 2023]. S. 331–536. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-57388-4_29. Aufgerufen am 20.08.2023
6. Volkskrankheiten / Deutschland hat Rücken und ringt nach Luft. Verfügbar unter: <https://www.presseportal.de/pm/34021/3446781>. Aufgerufen am 20.08.2023
7. Schmidt C, Bernert S, Spyra K. [Concerning the impact of psychological comorbidity for chronic back pain: frequency, reduced earning capacity pension and rehabilitation aftercare in the course of the rehabilitation cohorts 2002–2009]. *Rehabil*. Dezember 2014;53(6):384–9.
8. Linton SJ. A review of psychological risk factors in back and neck pain. *Spine*. 1. Mai 2000;25(9):1148–56.
9. Pincus T, Burton AK, Vogel S, Field AP. A systematic review of psychological factors as predictors of chronicity/disability in prospective cohorts of low back pain. *Spine*. 1. März 2002;27(5):E109-120.
10. Leitlinie Nicht-spezifischer Kreuzschmerz. Verfügbar unter: <https://www.leitlinien.de/themen/kreuzschmerz>. Aufgerufen am 28.08.2023
11. Von Korff M, Ormel J, Keefe FJ, Dworkin SF. Grading the severity of chronic pain. *Pain*. August 1992;50(2):133–49.
12. 033-0511_S2k_Spezifischer_Kreuzschmerz_2018-02. Verfügbar unter <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/187-059>. Aufgerufen am 20.08.2023

13. Itz CJ, Geurts JW, van Kleef M, Nelemans P. Clinical course of non-specific low back pain: a systematic review of prospective cohort studies set in primary care. *Eur J Pain Lond Engl*. Januar 2013;17(1):5–15.
14. Gilbert FJ, Grant AM, Gillan MGC, Vale LD, Campbell MK, Scott NW, Knight D, Wardlaw D. Low back pain: influence of early MR imaging or CT on treatment and outcome—multicenter randomized trial. *Radiology*. Mai 2004;231(2):343–51.
15. Online GL. WHO-Stufenplan | Gelbe Liste [Internet]. Verfügbar unter: <https://www.gelbe-liste.de/schmerztherapie/schmerztherapie-who-stufenplan>. Aufgerufen am 18.08.2023
16. Thieme-Für Sie analysiert – S2k-Leitlinie Spezifischer Kreuzschmerz - Physiotherapie - Georg Thieme Verlag. Verfügbar unter: <https://www.thieme.de/de/physiotherapie/s2k-leitlinie-spezifischer-kreuzschmerz-141570.htm>. Aufgerufen am 18.08.2023
17. Wiltse LL, Man N, Macnab I. Classification of Spondylolysis and Spondylolisthesis: *Clin Orthop*. Juni 1976;NA;(117):23–29.
18. Chen IR, Wei TS. Disc Height and Lumbar Index as Independent Predictors of Degenerative Spondylolisthesis in Middle-Aged Women With Low Back Pain. *Spine*. 1. Juni 2009;34(13):1402.
19. Sengupta DK, Herkowitz HN. Degenerative Spondylolisthesis: Review of Current Trends and Controversies. *Spine*. 15. März 2005;30(6S):S71.
20. Kalichman L, Hunter DJ. Diagnosis and conservative management of degenerative lumbar spondylolisthesis. *Eur Spine J*. 1. März 2008;17(3):327–35.
21. Wang YXJ, Káplár Z, Deng M, Leung JCS. Lumbar degenerative spondylolisthesis epidemiology: A systematic review with a focus on gender-specific and age-specific prevalence. *J Orthop Transl*. 1. Dezember 2016;11:39–52.
22. Ferrari S, Vanti C, Piccarreta R, Monticone M. Pain, disability, and diagnostic accuracy of clinical instability and endurance tests in subjects with lumbar spondylolisthesis. *J Manipulative Physiol Ther*. 2014;37(9):647–59.
23. Koslosky E, Gendelberg D. Classification in Brief: The Meyerding Classification System of Spondylolisthesis. *Clin Orthop*. Mai 2020;478(5):1125–30.
24. Akkawi I, Zmerly H. Degenerative Spondylolisthesis: A Narrative Review. *Acta Bio Medica Atenei Parm*. 2021;92(6):e2021313.
25. Dombrowski ME, Ryneerson B, LeVasseur C, Adgate Z, Donaldson WF, Lee JY, Aiyangar A, Anderst W. ISSLS PRIZE IN BIOENGINEERING SCIENCE 2018: Dynamic Imaging of Degenerative Spondylolisthesis Reveals Mid-Range Dynamic Lumbar Instability Not Evident on Static Clinical Radiographs. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. April 2018;27(4):752–62.
26. Watters WC, Bono CM, Gilbert TJ, Kreiner DS, Mazanec DJ, Shaffer WO, Baisden J, Easa J, Fernand R, Ghiselli G, Heggeness M, Mendel R, O'Neill C, Reitmann C, Resnick D,

- Summers J, Timmons R, Toton J. An evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of degenerative lumbar spondylolisthesis. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* Juli 2009;9(7):609–14.
27. Vargas MI, Boto J, Meling TR. Imaging of the spine and spinal cord: An overview of magnetic resonance imaging (MRI) techniques. *Rev Neurol (Paris).* 1. Mai 2021;177(5):451–8.
28. Martin AR, Aleksanderek I, Cohen-Adad J, Tarmohamed Z, Tetreault L, Smith N, Cadotte W, Crawley A, Ginsberg H, Mikulis D, Fehlings M Translating state-of-the-art spinal cord MRI techniques to clinical use: A systematic review of clinical studies utilizing DTI, MT, MWF, MRS, and fMRI. *NeuroImage Clin.* 4. Dezember 2015;10:192–238.
29. Poser BA, Setsompop K. Pulse sequences and parallel imaging for high spatiotemporal resolution MRI at ultra-high field. *NeuroImage.* März 2018;168:101–18.
30. Jiang W, Yang F, Wang K. Individualized and accurate SAR characterization method based on equivalent circuit model for MRI system. *Magn Reson Med.* Juni 2022;87(6):2997–3010.
31. Stradiotti P, Curti A, Castellazzi G, Zerbi A. Metal-related artifacts in instrumented spine. Techniques for reducing artifacts in CT and MRI: state of the art. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* Juni 2009;18 Suppl 1(Suppl 1):102–8.
32. Magnetresonanztomographie (MRT) – MAGNETOM® MRT-Scanner. Verfügbar unter: <https://www.siemens-healthineers.com/de/magnetic-resonance-imaging>. Aufgerufen am 18.09.2023
33. Demirturk Kocasarac H, Ustaoglu G, Bayrak S, Katkar R, Geha H, Deahl ST, Mealey B, Danci M, Noujeim M. Evaluation of artifacts generated by titanium, zirconium, and titanium-zirconium alloy dental implants on MRI, CT, and CBCT images: A phantom study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* Juni 2019;127(6):535–44.
34. Bennett LH, Wang PS, Donahue MJ. Artifacts in magnetic resonance imaging from metals. *J Appl Phys.* 15. April 1996;79(8):4712–4.
35. Koreckij TD, Fischgrund JS. Degenerative Spondylolisthesis. *Clin Spine Surg.* August 2015;28(7):236.
36. Willén J, Danielson B, Gaulitz A, Niklason T, Schönström N, Hansson T. Dynamic effects on the lumbar spinal canal: axially loaded CT-myelography and MRI in patients with sciatica and/or neurogenic claudication. *Spine.* 15. Dezember 1997;22(24):2968–76.
37. Petzhold T, Tesch F, Adler J-B, Günster C, Niethard F-U, Schmitt J. 10-Jahresentwicklung operativer Eingriffe an der Wirbelsäule in Deutschland- Eine Analyse von Krankenkassendaten von 2005-2014. *Z Orthop Unfall* 2018; 156(03): 298-305. DOI: 10.1055/s-0043-124768.
38. Pumberger M, Chiu YL, Ma Y, Girardi FP, Mazumdar M, Memtsoudis SG. National in-hospital morbidity and mortality trends after lumbar fusion surgery between 1998 and 2008. *J Bone Joint Surg Br.* März 2012;94(3):359–64.

39. Tumialán LM. Future Studies and Directions for the Optimization of Outcomes for Lumbar Spondylolisthesis. *Neurosurg Clin N Am*. 1. Juli 2019;30(3):373–81.
40. Morse KW, Steinhaus M, Bovonratwet P, Kazarian G, Gang CH, Vaishnav AS, Lafage R, Iyer S, Qureshi S. Current treatment and decision-making factors leading to fusion vs decompression for one-level degenerative spondylolisthesis: survey results from members of the Lumbar Spine Research Society and Society of Minimally Invasive Spine Surgery. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. November 2022;22(11):1778–87.
41. Teng I, Han J, Phan K, Mobbs R. A meta-analysis comparing ALIF, PLIF, TLIF and LLIF. *J Clin Neurosci Off J Neurosurg Soc Australas*. Oktober 2017;44:11–7.
42. Schnake KJ, Rappert D, Storzer B, Schreyer S, Hilber F, Mehren C. Lumbale Spondylodese – Indikationen und Techniken. *Orthop*. 1. Januar 2019;48(1):50–8.
43. Liao Z, Wang CH, Cui WL. Comparison of Allograft and Autograft in Lumbar Fusion for Lumbar Degenerative Diseases: A Systematic Review. *J Investig Surg Off J Acad Surg Res*. Dezember 2016;29(6):373–82.
44. Ito Z, Imagama S, Kanemura T, Hachiya Y, Miura Y, Kamiya M, Yukawa Y, Yoshihito S, Katayama Y, Wakao N, Matsuyama Y, Ishiguro N. Bone union rate with autologous iliac bone versus local bone graft in posterior lumbar interbody fusion (PLIF): a multicenter study. *Eur Spine J*. 1. Mai 2013;22(5):1158–63.
45. de Kunder SL, van Kuijk SMJ, Rijkers K, Caelers IJMH, van Hemert WLW, de Bie RA, Santbrink H. Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) versus posterior lumbar interbody fusion (PLIF) in lumbar spondylolisthesis: a systematic review and meta-analysis. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. November 2017;17(11):1712–21.
46. Khan NR, Clark AJ, Lee SL, Venable GT, Rossi NB, Foley KT. Surgical Outcomes for Minimally Invasive vs Open Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: An Updated Systematic Review and Meta-analysis. *Neurosurgery*. Dezember 2015;77(6):847–74; discussion 874.
47. Tatsumi R, Lee YP, Khajavi K, Taylor W, Chen F, Bae H. In vitro comparison of endplate preparation between four mini-open interbody fusion approaches. *Eur Spine J*. 1. April 2015;24(3):372–7.
48. Fleege C, Rickert M, Rauschmann M. [The PLIF and TLIF techniques. Indication, technique, advantages, and disadvantages]. *Orthopade*. Februar 2015;44(2):114–23.
49. Bateman DK, Millhouse PW, Shahi N, Kadam AB, Maltenfort MG, Koerner JD, Vaccaro A. Anterior lumbar spine surgery: a systematic review and meta-analysis of associated complications. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. 1. Mai 2015;15(5):1118–32.
50. Schneider N, Fisher C, Glennie A, Urquhart J, Street J, Dvorak M, Paquette S, Charest-Morin R, Ailon T, Manson N, Thomas K, Rasoulinejad P, Rampersaud R, Bailey C. Lumbar degenerative spondylolisthesis: factors associated with the decision to fuse. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. Mai 2021;21(5):821–8.

51. Steiger F, Becker HJ, Standaert CJ, Balague F, Vader JP, Porchet F, Mannion A. Surgery in lumbar degenerative spondylolisthesis: indications, outcomes and complications. A systematic review. *Eur Spine J.* 1. Mai 2014;23(5):945–73.
52. Schönengel L, Caffard T, Zhu J, Tani S, Camino-Willhuber G, Amini DA, Haffner H., Muellner M., Guven A., Chiapparelli E., Arzani A., Amoroso K., Shue J., Duculan R., Zippelius T., Sama A., Cammisa F., Girardi F., Mancuso C., Hughes A. Decision-making Algorithm for the Surgical Treatment of Degenerative Lumbar Spondylolisthesis of L4/L5. *Spine.* 15. Juni 2023;
53. Oswestry low back disability questionnaire. Verfügbar unter: <https://www.aaos.org/globalassets/quality-and-practice-resources/patient-reported-outcome-measures/spine/oswestry-2.pdf>. Aufgerufen am 18.08.2023
54. Fairbank JC, Pynsent PB. The Oswestry Disability Index. *Spine.* 15. November 2000;25(22):2940–52; discussion 2952. DOI: 10.1097/00007632-200011150-00017.
55. Ghogawala Z, Dziura J, Butler WE, Dai F, Terrin N, Magge SN, Coumans J-V., Harrington J., Amin-Hanjani S., Schwartz J., Sonntag V., Barker 2nd F., Benzel E. Laminectomy plus Fusion versus Laminectomy Alone for Lumbar Spondylolisthesis. *N Engl J Med.* 14. April 2016;374(15):1424–34.
56. Försth P, Ólafsson G, Carlsson T, Frost A, Borgström F, Fritzell P, Öhagen P., Michaelsson K., Sanden B. A Randomized, Controlled Trial of Fusion Surgery for Lumbar Spinal Stenosis. *N Engl J Med.* 14. April 2016;374(15):1413–23.
57. Kalichman L, Carmeli E, Been E. The Association between Imaging Parameters of the Paraspinal Muscles, Spinal Degeneration, and Low Back Pain. *BioMed Res Int.* 2017;2017:2562957.
58. Han G, Wu H, Dai J, Li X, Yue L, Fan Z, Qiaoyo L., Qirui S., Jiang Y., Li W. Does paraspinal muscle morphometry predict functional status and re-operation after lumbar spinal surgery? A systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol.* 2023;33(8):5269–81.
59. Pinter ZW, Mikula AL, Townsley SE, Salmons Iv HI, Lakomkin N, Michalopoulos GD, Nassr A, Freedmann B, Bydon M, Hogelson J, Sebastian A, Elder B. Lower Hounsfield Units and Severe Multifidus Sarcopenia Are Independent Predictors of Increased Risk for Proximal Junctional Kyphosis and Failure Following Thoracolumbar Fusion. *Spine.* 15. Februar 2023;48(4):223–31.
60. Ranger TA, Cicuttini FM, Jensen TS, Heritier S, Urquhart DM. Paraspinal muscle cross-sectional area predicts low back disability but not pain intensity. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* Mai 2019;19(5):862–8.
61. Appell HJ. Muscular atrophy following immobilisation. A review. *Sports Med Auckl NZ.* Juli 1990;10(1):42–58.
62. Danneels LA, Vanderstraeten GG, Cambier DC, Witvrouw EE, De Cuyper HJ. CT imaging of trunk muscles in chronic low back pain patients and healthy control subjects. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* August 2000;9(4):266–72.

63. Gengyu H, Jinyue D, Chunjie G, Bo Z, Yu J, Jiaming L, Wishi L. The predictive value of preoperative paraspinal muscle morphometry on complications after lumbar surgery: a systematic review. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. Februar 2022;31(2):364–79.
64. Muellner M, Chiapparelli E, Haffer H, Dodo Y, Salzmann SN, Adl Amini D, Moser M., Zhu J., Carrino J., Tan E., Shue J., Sama A., Camissa F., Girardi F., Hughes A. The association between paraspinal muscle parameters and vertebral pedicle microstructure in patients undergoing lumbar fusion surgery. *Int Orthop*. April 2023;47(4):1051–60.
65. Creze M, Soubeyrand M, Gagey O. The paraspinal muscle-tendon system: Its paradoxical anatomy. *PLoS ONE*. 8. April 2019;14(4):e0214812.
66. R.L. Drake, W.Vogl, A.W.M. Mitchell. *Gray's Anatomy*. Verlag Churchill Livingstone Elsevir. Auflage 2010. ISBN 0443069522, 97804430695291.
67. Alfen D med FM, Spang DC, Spang D med FMA Dr Christoph. Die tiefliegende autochthone Rückenmuskulatur- Sportärztezeitung. Verfügbar unter: <https://sportaerztezeitung.com/rubriken/training/14047/die-tiefliegende-autochthone-rueckenmuskulatur/>. Aufgerufen am 25.09.2023
68. Wagner H, Anders C, Puta C, Petrovitch A, Mörl F, Schilling N, Witte H, Blickhan R. Musculoskeletal support of lumbar spine stability. *Pathophysiol Off J Int Soc Pathophysiol*. Dezember 2005;12(4):257–65.
69. Fortin M, Lazáry À, Varga PP, McCall I, Battié MC. Paraspinal muscle asymmetry and fat infiltration in patients with symptomatic disc herniation. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. Mai 2016;25(5):1452–9.
70. Bottinelli R, Reggiani C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. *Prog Biophys Mol Biol*. 1. Februar 2000;73(2):195–262.
71. Takayama K, Kita T, Nakamura H, Kanematsu F, Yasunami T, Sakanaka H, u. a. New Predictive Index for Lumbar Paraspinal Muscle Degeneration Associated With Aging. *Spine*. Januar 2016;41(2):E84-90.
72. Vettor R, Milan G, Franzin C, Sanna M, De Coppi P, Rizzuto R, Federspil G. The origin of intermuscular adipose tissue and its pathophysiological implications. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. November 2009;297(5):E987-998.
73. Alfen D med FM, Spang DC, Domokos B, Domokos D med FMA Dr Christoph Spang , Bruno. Autochthone Rückenmuskulatur- Sportärztezeitung. Verfügbar unter: <https://sportaerztezeitung.com/rubriken/training/15070/autochthone-rueckenmuskulatur/>. Aufgerufen am 25.09.2023
74. Laasonen EM. Atrophy of sacrospinal muscle groups in patients with chronic, diffusely radiating lumbar back pain. *Neuroradiology*. 1984;26(1):9–13.

75. Kalichman L, Klindukhov A, Li L, Linov L. Indices of Paraspinal Muscles Degeneration: Reliability and Association With Facet Joint Osteoarthritis: Feasibility Study. *Clin Spine Surg.* November 2016;29(9):465–70.
76. Kjaer P, Bendix T, Sorensen JS, Korsholm L, Leboeuf-Yde C. Are MRI-defined fat infiltrations in the multifidus muscles associated with low back pain? *BMC Med.* 25. Januar 2007;5:2.
77. Muellner M, Haffer H, Chiapparelli E, Dodo Y, Tan ET, Shue J, Zhu J, Sama A, Cammisa F, Girardi F, Hughes A. Differences in lumbar paraspinal muscle morphology in patients with sagittal malalignment undergoing posterior lumbar fusion surgery. *Eur Spine J.* 1. November 2022;31(11):3109–18.
78. Moser M, Adl Amini D, Jones C, Zhu J, Okano I, Oezel L, Chiapparelli E, tan E, Shue J, Sama A, Cammisa F, Girardi F, Hughes A. The predictive value of psoas and paraspinal muscle parameters measured on MRI for severe cage subsidence after standalone lateral lumbar interbody fusion. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* Januar 2023;23(1):42–53.
79. Hoy MG, Zajac FE, Gordon ME. A musculoskeletal model of the human lower extremity: The effect of muscle, tendon, and moment arm on the moment-angle relationship of musculotendon actuators at the hip, knee, and ankle. *J Biomech.* Januar 1990;23(2):157–69.
80. Niemeläinen R, Briand MM, Battié MC. Substantial asymmetry in paraspinal muscle cross-sectional area in healthy adults questions its value as a marker of low back pain and pathology. *Spine.* Dezember 2011;36(25):2152–7.
81. Muellner M, Haffer H, Moser M, Chiapparelli E, Dodo Y, Adl Amini D, Carrino J, Tan E, Shue J, Zhu J, Sama A, Cammisa F, Girardi F, Hughes A. Paraspinal musculature impairment is associated with spinopelvic and spinal malalignment in patients undergoing lumbar fusion surgery. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* Dezember 2022;22(12):2006–16.
82. Shigematsu H, Ueda Y, Takeshima T, Koizumi M, Satoh N, Matsumori H, Oshima T, Tanaka M, Kugai A, Takakura Y, Tanaka Y. Degenerative spondylolisthesis does not influence surgical results of laminoplasty in elderly cervical spondylotic myelopathy patients. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* Mai 2010;19(5):720–5.
83. Zhu R, Niu WX, Zeng ZL, Tong JH, Zhen ZW, Zhou S, Yu Y, Cheng L. The effects of muscle weakness on degenerative spondylolisthesis: A finite element study. *Clin Biomech Bristol Avon.* Januar 2017;41:34–8.
84. Wang G, Karki SB, Xu S, Hu Z, Chen J, Zhou Z, u. a. Quantitative MRI and X-ray analysis of disc degeneration and paraspinal muscle changes in degenerative spondylolisthesis. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2015;28(2):277–85.
85. Li C, Wang L, Wang Z, Li D, Ibrahim Y, Tian Y, Fan S. Radiological Changes of Paraspinal Muscles: A Comparative Study of Patients with Isthmic Spondylolisthesis, Patients with Degenerative Lumbar Spondylolisthesis, and Healthy Subjects. *J Pain Res.* 11. November 2022;15:3563–73.

86. Teichtahl AJ, Urquhart DM, Wang Y, Wluka AE, Wijethilake P, O'Sullivan R, Cicuttini F. Fat infiltration of paraspinal muscles is associated with low back pain, disability, and structural abnormalities in community-based adults. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* 1. Juli 2015;15(7):1593–601.
87. Bailey JF, Fields AJ, Ballatori A, Cohen D, Jain D, Coughlin D, O'Neill C, McCormick Z, Han M, Krug R, Demir-Deviren S, Lotz J. The Relationship Between Endplate Pathology and Patient-reported Symptoms for Chronic Low Back Pain Depends on Lumbar Paraspinal Muscle Quality. *Spine.* 15. Juli 2019;44(14):1010–7.
88. Taaffe DR, Sipilä S, Cheng S, Puolakka J, Toivanen J, Suominen H. The effect of hormone replacement therapy and/or exercise on skeletal muscle attenuation in postmenopausal women: a yearlong intervention. *Clin Physiol Funct Imaging.* September 2005;25(5):297–304.
89. Sparrey CJ, Bailey JF, Safae M, Clark AJ, Lafage V, Schwab F, Smith J, Ames C. Etiology of lumbar lordosis and its pathophysiology: a review of the evolution of lumbar lordosis, and the mechanics and biology of lumbar degeneration. *Neurosurg Focus.* Mai 2014;36(5):E1.
90. Romero-Vargas S, Zárate-Kalfópulos B, Otero-Cámara E, Rosales-Olivarez L, Alpízar-Aguirre A, Morales-Hernández E, Reyes-Sanchez A. The impact of body mass index and central obesity on the spino-pelvic parameters: a correlation study. *Eur Spine J.* April 2013;22(4):878–82.
91. Arshad R, Pan F, Reitmaier S, Schmidt H. Effect of age and sex on lumbar lordosis and the range of motion. A systematic review and meta-analysis. *J Biomech.* 3. Januar 2019;82:1–19.
92. Cabraja M, Mohamed E, Koeppen D, Kroppenstedt S. The analysis of segmental mobility with different lumbar radiographs in symptomatic patients with a spondylolisthesis. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* Februar 2012;21(2):256–61.
93. Thakar S, Sivaraju L, Aryan S, Mohan D, Sai Kiran NA, Hegde AS. Lumbar paraspinal muscle morphometry and its correlations with demographic and radiological factors in adult isthmic spondylolisthesis: a retrospective review of 120 surgically managed cases. *J Neurosurg Spine.* Mai 2016;24(5):679–85.
94. Muellner M, Chiapparelli E, Moser M, Haffer H, Dodo Y, Adl Amini D, Carrino J, Tan E, Shue J, Zhu J, Sama A, Cammisa F, Girardi F, Hughes A. The effect of age on psoas and paraspinal muscle morphology in patients undergoing posterior lumbar fusion surgery. *Eur Spine J.* 1. Oktober 2022;31(10):2619–28.
95. Seyedhoseinpoor T, Taghipour M, Dadgoo M, Sanjari MA, Takamjani IE, Kazemnejad A, Khshamooz Y, Hides J. Alteration of lumbar muscle morphology and composition in relation to low back pain: a systematic review and meta-analysis. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* April 2022;22(4):660–76.
96. Freeman MD, Woodham MA, Woodham AW. The role of the lumbar multifidus in chronic low back pain: a review. *PM R.* Februar 2010;2(2):142–6; quiz 1 p following 167.

97. Ranger TA, Cicuttini FM, Jensen TS, Peiris WL, Hussain SM, Fairley J, Urquhart D. Are the size and composition of the paraspinal muscles associated with low back pain? A systematic review. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* November 2017;17(11):1729–48.
98. Shahidi B, Hubbard JC, Gibbons MC, Ruoss S, Zlomislic V, Allen RT, Garfin S, Ward S. Lumbar multifidus muscle degenerates in individuals with chronic degenerative lumbar spine pathology. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc.* Dezember 2017;35(12):2700–6.
99. Agha O, Mueller-Immergluck A, Liu M, Zhang H, Theologis AA, Clark A, Kim H, Liu X, Feeley B, Bailey J. Intervertebral disc herniation effects on multifidus muscle composition and resident stem cell populations. *JOR Spine.* Juni 2020;3(2):e1091.
100. Agten A, Stevens S, Verbrugghe J, Eijnde BO, Timmermans A, Vandenabeele F. The lumbar multifidus is characterised by larger type I muscle fibres compared to the erector spinae. *Anat Cell Biol.* 30. Juni 2020;53(2):143–50.
101. Hides JA, Stanton WR, McMahon S, Sims K, Richardson CA. Effect of stabilization training on multifidus muscle cross-sectional area among young elite cricketers with low back pain. *J Orthop Sports Phys Ther.* März 2008;38(3):101–8.
102. Sousa-Victor P, García-Prat L, Muñoz-Cánoves P. Control of satellite cell function in muscle regeneration and its disruption in ageing. *Nat Rev Mol Cell Biol.* März 2022;23(3):204–26.
103. Muellner M, Haffer H, Chiapparelli E, Dodo Y, Tan ET, Shue J, Zhu J, Sama A, Camissa F, Girardi F, Hughes A. Differences in lumbar paraspinal muscle morphology in patients with sagittal malalignment undergoing posterior lumbar fusion surgery. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* November 2022;31(11):3109–18.
104. Nielsen PR, Jørgensen LD, Dahl B, Pedersen T, Tønnesen H. Prehabilitation and early rehabilitation after spinal surgery: randomized clinical trial. *Clin Rehabil.* Februar 2010;24(2):137–48.
105. Lindbäck Y, Tropp H, Enthoven P, Abbott A, Öberg B. PREPARE: Pre-surgery physiotherapy for patients with degenerative lumbar spine disorder: a randomized controlled trial protocol. *BMC Musculoskelet Disord.* 11. Juli 2016;17:270.
106. Lindbäck Y, Tropp H, Enthoven P, Abbott A, Öberg B. PREPARE: presurgery physiotherapy for patients with degenerative lumbar spine disorder: a randomized controlled trial. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* August 2018;18(8):1347–55.
107. Fors M, Enthoven P, Abbott A, Öberg B. Effects of pre-surgery physiotherapy on walking ability and lower extremity strength in patients with degenerative lumbar spine disorder: Secondary outcomes of the PREPARE randomised controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord.* 24. Oktober 2019;20(1):468.

108. Marchand AA, Houle M, O'Shaughnessy J, Châtillon CÉ, Cantin V, Descarreaux M. Effectiveness of an exercise-based prehabilitation program for patients awaiting surgery for lumbar spinal stenosis: a randomized clinical trial. *Sci Rep.* 26. Mai 2021;11:11080.
109. Bogaert L, Thys T, Depreitere B, Dankaerts W, Amerijckx C, Van Wambeke P, Jacobs K, Boonen H, Brumagne S, Moke L, Schelfaut S, Spriet A, Peers K, Swinnen T, Janssens. Rehabilitation to improve outcomes of lumbar fusion surgery: a systematic review with meta-analysis. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* Juni 2022;31(6):1525–45.
110. Chan AK, Bisson EF, Bydon M, Glassman SD, Foley KT, Potts EA, Shaffrey C, Shaffrey M, Coric D, Knightly J, Park P, Wang M, Fu K-M, Slotkin J, Asher A, Virk M, Kerezoudis P, Di Giorgio A, Haid R, Mummaneni P. Obese Patients Benefit, but do not Fare as Well as Nonobese Patients, Following Lumbar Spendylolisthesis Surgery: An Analysis of the Quality Outcomes Database. *Neurosurgery.* 1. Januar 2020;86(1):80–7.
111. Agarwal N, Aabedi AA, Chan AK, Letchuman V, Shabani S, Bisson EF, Bydon M, Glassmann S, Foley K, Shaffrey C, Potts E, Shaffrey M, Coric D, Knightly J, Park P, Wang M, fu K-M, Slotkin J, Asher A, Virk M, Haid R, Chou D, Mummaneni P. Leveraging machine learning to ascertain the implications of preoperative body mass index on surgical outcomes for 282 patients with preoperative obesity and lumbar spendylolisthesis in the Quality Outcomes Database. *J Neurosurg Spine.* 1. Februar 2023;38(2):182–91.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Dr. med. dent. Ulrike Inge Kielburg, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

Der Einfluss der degenerativen lumbalen Spondylolisthese auf die paraspinale Muskulatur, Impact of degenerative lumbar spondylolisthesis on the paraspinal muscles selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

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

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

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

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

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

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Danksagung

An erster Stelle möchte ich allen Menschen besonders danken, die mich auch bei der Anfertigung meiner zweiten Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Friederike für die ausgezeichnete Betreuung und die enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit. Du hast mir ermöglicht Freude am wissenschaftlichen Arbeiten zu entdecken. Die Zusammenarbeit war wirklich hervorragend und ich freue mich sehr auf viele weitere gemeinsame Erlebnisse.

Christian, dir Danke ich für die enorme Unterstützung und Motivation, die du auch in diesem Abschnitt mir immer gegeben hast. Danke, dass du immer an meiner Seite bist.

Alfred, vielen Dank dass du mir als Leser stets treu geblieben bist. Ich hoffe dir noch viel spannende Lektüre liefern zu können.

Meinen Eltern und Freunden danke ich für ihre Geduld, Ermutigungen und nicht ermüdende Motivation während meiner beiden Studien und Promotionen.

Mama und Papa, ich Danke euch unendlich, dass ihr mir diesen langen Ausbildungsweg ermöglicht habt und mich dabei immer unterstützt habt.