

Fakultät für Medizin

Klinik für Neurochirurgie – Klinikum Bogenhausen

**Etablierung prädiktiver Faktoren für
sagittale spino-pelvine Balance und
optimierte Ergebnisse in der operativen Behandlung
hochgradiger Spondylolisthesen und Spondyloptosen**

Karoline Eva Maria Habicht

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Medizin (Dr. med.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Ernst J. Rummeny
Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr. Christiano B. Lumenta
2. Prof. Dr. Bernhard Meyer

Die Dissertation wurde am 26.08.2020 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 17.03.2021 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Krankheitsbild und Definition	1
1.1.1 Epidemiologie, Ätiologie und Genese	2
1.1.2 Klassifikationen	3
1.1.2.1 Klassifikation nach Meyerding	3
1.1.2.2 Klassifikation nach Newman und Wiltse	4
1.1.2.3 Klassifikation nach Mac-Thiong und Labelle	5
1.1.3 Diagnostik	6
1.1.3.1 Klinisches Erscheinungsbild	6
1.1.3.2 Bildgebung	8
1.1.4 Therapie	10
1.1.4.1 Konservative Therapie	10
1.1.4.2 Operative Therapie	11
1.1.4.2.1 Einfache Spondylodese (D-V)	13
1.1.4.2.2 Kombinierte ventrodorsale Repositionsspondylodese (V-D)	13
1.1.4.2.3 Gaines-Verfahren mit Korporektomie (V-D-V-Spondylodese)	13
1.1.4.2.4 Nachbehandlung	14
1.1.4.2.5 Risiken und Komplikationen	15
1.2 Aktueller Stand der Wissenschaft	17
1.2.1 Sagittale und spino-pelvine Balance	17
1.3 Fragestellung und Zielsetzung	24
2 Patienten und Methoden	25
2.1 Patientenkollektiv	25
2.1.1 Einschlusskriterien	25
2.1.2 Ausschlusskriterien	25
2.2 Operationstechniken	25
2.3 Radiologische Parameter	27
2.3.1 Lateraler Strahlengang der LWS	27

2.3.1.1	Sakrumkipfung/Beckenneigung, ‚Sacral Slope‘ (SS)	27
2.3.1.2	Pelviner Inzidenzwinkel, ‚Pelvic Incidence‘ (PI)	27
2.3.1.3	Beckenrotation, ‚Pelvic Tilt‘ (PT).....	27
2.3.1.4	Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation	29
2.3.1.5	L5-Slope	30
2.3.1.6	L4-Slope	30
2.3.1.7	‚Lumbal-sacral-angle‘ (LSA).....	30
2.3.2	Lateraler Strahlengang der kompletten Wirbelsäule	32
2.3.2.1	Vertikale Distanz L5-S1	32
2.3.2.2	Lumbale Lordose (LL).....	32
2.3.2.3	Thorakale Kyphose (TK).....	32
2.3.2.4	Transition Vertebra Tilt, Neigung des Übergangswirbelkörpers.....	32
2.3.2.5	Sagittal vertical Axis, sagittal-vertikale Achse (SVA, C7-SPL, C7-Lot)	32
2.3.3	Wirbelsäule in anterior-posteriorem Strahlengang	34
2.3.3.1	Thorakale Kurve (TC)	34
2.3.3.2	Lumbale Kurve (LC).....	34
2.3.3.3	L4-Take-off, Kippung des 4. Lendenwirbelkörpers	34
2.3.3.4	C7-CSVL, C7-Centre Sacral vertical Line	34
2.4	Fragebogen zur gesundheitsbezogenen Lebensqualität (HrQoL)	35
2.4.1	Standardisierter Fragebogen	35
2.4.2	ODI-Fragebogen	35
2.4.3	SF-36-Fragebogen	36
2.5	Gruppencharakterisierung	36
2.6	Statistik	37
3	Ergebnisse.....	38
3.1	Patientenkollektiv	38
3.2	Radiologische Ergebnisse	39
3.2.1	Listhesegrad	39
3.2.2	Sagittales pelvines Profil.....	41
3.2.2.1	Pelvic Incidence (PI)	42
3.2.2.2	Sacral Slope (SS)	44
3.2.3	Sagittales spinale Alignment	44

3.2.3.1	Lumbosakrale Kyphose (LSA und L4-Slope)	47
3.3	Chirurgische Ergebnisse	49
3.3.1	Operation	49
3.3.2	Instrumentierte Segmente	50
3.3.3	Revisionseingriffe	50
3.3.4	Major-Komplikationen	53
3.3.5	Lumbosakrale Pseudarthrose	55
3.3.6	Fußheberparese	55
3.4	Klinisch-statistische Ergebnisse	58
3.4.1	Gruppenunterschiede zw. Patienten mit / ohne klinische Fragebögen	58
3.4.2	Korrelation zwischen klinischen und radiologischen Parametern	58
4	Diskussion	60
4.1	Chirurgisches Outcome	60
4.2	Klinisches Outcome	63
4.3	Major-Komplikationen	64
4.3.1	Lumbosakrale Pseudarthrose	66
4.3.2	Fußheberparese	67
4.4	Risikofaktoren für Komplikationen nach HGS-Reposition	70
4.5	Limitationen	74
5	Schlussfolgerung	75
6	Zusammenfassung	76
7	Fallserien	78
7.1	Patient 1 – Spondylolisthese IV°	78
7.2	Patient 2 - Spondylolisthese III°	79
8	Anhang	80
8.1	Fragebogen	80
9	Literaturverzeichnis	89
10	Tabellenverzeichnis	99
11	Abbildungsverzeichnis	100
12	Eidesstattliche Erklärung	103
13	Danksagung	104

Abkürzungsverzeichnis

HGS	Hochgradige Spondylolisthese
TC	Thoracic Curve
LC	Lumbal Curve
CSVL	Central Sacral Vertical Line
L4-To	L4-Take off; Abhebung des 4. Lendenwirbelkörpers
PI	Pelvic Incidence
PT	Pelvic Tilt; Becken-Neigung
SS	Sacral Slope; Kreuzbein-Steilheit / Neigung / Gefälle
TK	Thoracic Kyphosis; thorakale Kyphose
LL	Lumbar Lordosis; lumbale Lordose
LSA	Lumbar Sacral Angle; lumbosakraler Winkel
SVA	Sagittal vertical Axis; sagittal-vertikale Achse
MD	Meyerding
L5-T	L5-Translation / Listheseegrad
L4-S	L4-Slope
UIV	upper instrumented vertebra; oberster instrumentierter Wirbelkörper
LIV	last instrumented vertebra; unterster instrumentierter Wirbelkörper
Vgl.	vergleiche
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
et. al	und andere
a. p.	anterior-posterior
n	number; Anzahl
na	no answer; keine Antwort / nicht angegeben
FU	Follow-up; Nachuntersuchung
Präop	präoperativ
Postop	postoperativ
HWS	Halswirbelsäule
BWS	Brustwirbelsäule
LWS	Lendenwirbelsäule
ME	Metallentfernung
z. B.	zum Beispiel
MEAN	Mittelwert
±	plus / minus

SD	Standardabweichung
p-Wert	Signifikanzwert / p-value
r-Wert	Korrelationswert
L5	Lendenwirbelkörper Nr.5 (äquivalent L4)
S1	Kreuzbeinwirbel (-körper)
C7	Halswirbelkörper Nr. 7
WHS	Wundheilungsstörung
Umgspr.	Umgangssprachlich
B	balancierte Spondylolisthese
UB	unbalancierte Spondylolisthese
L5-KE	L5-Korporektomie
FHP	Fußheberparese
HrQoL	Health-related Quality of Life, gesundheitsbezogenen Lebensqualität

1 Einleitung

1.1 Krankheitsbild und Definition

Die Spondylolisthese, zu Deutsch Wirbelgleiten oder Spondylolisthese, wird abgeleitet von dem Griechischen ‚spondylo‘ – ‚Wirbel‘ und ‚olisthesis‘ – ‚Gleiten‘. Taillard definiert Wirbelgleiten folgend: „Eine Spondylolisthese ist die Verschiebung eines Wirbelkörpers nach vorne, gemeinsam mit seiner Bogenwurzel, seinen Querfortsätzen und seinen Procc. articul. sup. Dieser Gleitvorgang wird durch eine Kontinuitätstrennung oder eine Elongation der Interartikularportion des Wirbelkörpers bzw. des Isthmus ermöglicht.“ (Taillard 1959).

Meist geschieht dies im lumbosakralen Wirbelsäulenübergang (zwischen L5 und S1 oder L4 und L5), wie auf nachfolgender Abbildung beispielhaft sichtbar.



Abb. 1: Spondylolisthese: Wirbelkörper eingefärbt, Wirbelkörper L5 gleitet nach ventral ab (Getty Images/Creative 2014).

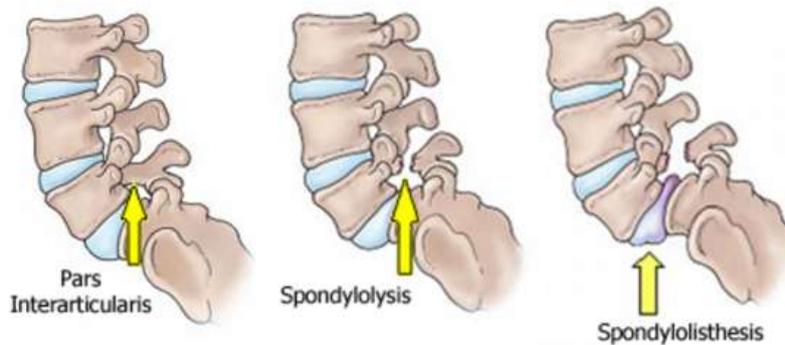


Abb. 2: Entwicklung einer Spondylolisthese über die Spondylolyse in der Pars Interarticularis eines Wirbelkörpers (De Rug.nl 2014).

1.1.1 Epidemiologie, Ätiologie und Genese

Das Krankheitsbild der Spondylolisthesis ist von multifaktorieller Genese und wird durch genetische, mechanische und hormonelle Faktoren beeinflusst. Die genetische Beeinflussung zeigt sich in der Häufigkeit der Spondylolyse und Spondylolisthesis bei verschiedenen ethnischen Gruppen: Inuit ca. 33 - 54 % versus Schwarze 1 - 9 % Prävalenz einer Spondylolyse (Engelhardt et al. 1997; Fritsch 2003; Seller und Wild 2005). Ebenso zeigt sich eine hormonelle Beeinflussung bei der Entstehung einer Spondylolyse vor allem bei der Geschlechter-Verteilung: Eine Spondylolyse ist bei Männern zwei- bis dreimal häufiger zu finden, während bei weiblichen Personen eine hochgradige Spondylolisthesis bis zu viermal häufiger diagnostizierbar ist (Seller und Wild 2005). Die mechanische Komponente zur Entstehung einer Spondylolisthesis zeigt sich vor allem in der körperlichen Entwicklung. Zum Zeitpunkt der Geburt konnte bisher keine Spondylolyse bei Neugeborenen festgestellt werden. Im 6. Lebensjahr haben statistisch 4 bis 5 % der Kinder eine Spondylolyse, bei Wachstumsabschluss bereits 6 bis 7 % (Schlenzka 1997). Ebenso auffällig ist, dass ca. 80 bis 90 % der Spondylolysen im Segment L5-S1 zu finden sind, und nur 5 bis 10 % im höher gelegenen Segment L4-L5, darüber liegende Wirbelkörper sind nur sehr selten betroffen (Schlenzka 1997; Fritsch 2003; Seller und Wild 2005). An der unreifen Wirbelsäule, v. a. am proximalen Sakrum, zeigen sich ernsthafte Beschädigungen an der Endplatte, die sich bei bestehender, niedriggradiger Spondylolisthesis im Kindesalter durch Störungen im Wachstumsalter im Sinne eines epiphysealen Gleitens häufig zu einer Spondyloptose entwickeln. Als Hauptursache bzw. Risikofaktor beschreibt Yue et al. hierbei die pathologische Rundung der Sakrum-Endplatte (Yue et al. 2005). Außerdem lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Entstehung einer Spondylolisthesis mit der Ausübung verschiedener Sportarten feststellen, welche mit starken körperlichen Belastungen in Hyperextension bzw. Hyperlordose – umgangssprachlich Hohlkreuz – sowie einer vermehrten Drehung im Lendenwirbelbereich einhergehen. Bedingt sind diese auch durch rezidivierende Mikrotraumata während der Wachstumsphase bei Ausübung eines Leistungssports. Hierbei sind vor allem folgende Sportarten hervorzuheben: Gymnastik / Akrobatik, Ballett, Trampolinspringen, Speerwerfen, Gewichtheben, Golfen, Brust- und Delphinschwimmen, Ringen, Rudern etc. (Engelhardt et al. 1997, S. 756). Zwei Studien aus den Jahren 2010 und 2015 über Spondylolisthesis bei Turnern zeigten eine ähnliche Prävalenz mit 5.6 bis 6.5 % zur Entwicklung einer Spondylolisthesis auf, vergleichbar zur gesunden Kontroll-Bevölkerung (Mohriak et al. 2010; Toueg et al. 2015).

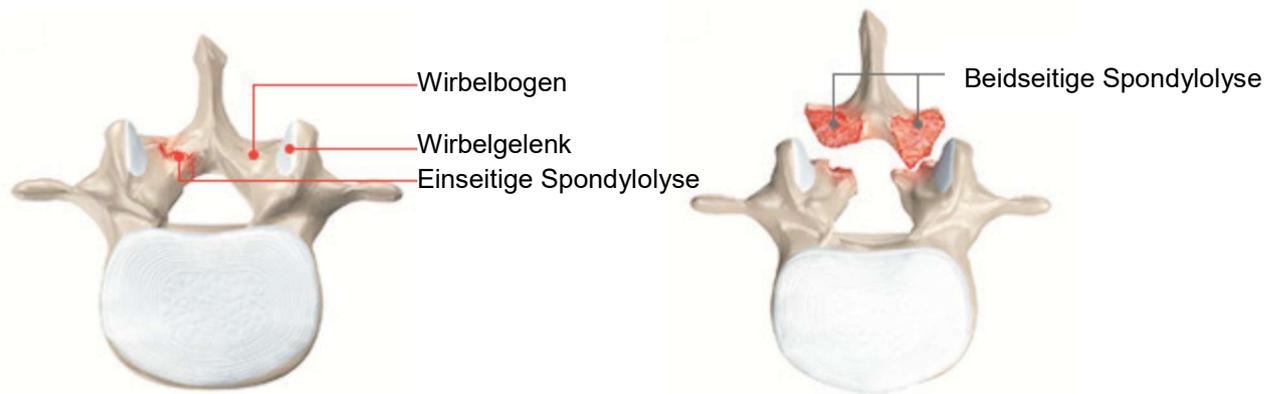


Abb. 3: Spondylolyse: links - einseitig, rechts - beidseits: Pars Interarticularis durchbrochen durch lytischen Prozess (Harms 2007).

1.1.2 Klassifikationen

1.1.2.1 Klassifikation nach Meyerding

Das Abgleiten des Wirbelkörpers über das Sakrum wird graduell nach Meyerding beschrieben, der im Jahr 1931 die erste und bis heute gültige Klassifikation dazu verfasste (MEYERDING 1931). Hierbei wird die Spondylolisthese in geringgradig (Grad I und II) und hochgradig (Grad III und IV) eingeteilt sowie in ein komplettes Abkippen des Wirbelkörpers, genannt Spondyloptose (Grad V), welches die schwerste Form des Wirbelgleitens darstellt. Eine Skizze zur Verdeutlichung des graduellen Abrutschens sieht man in folgenden Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 20.

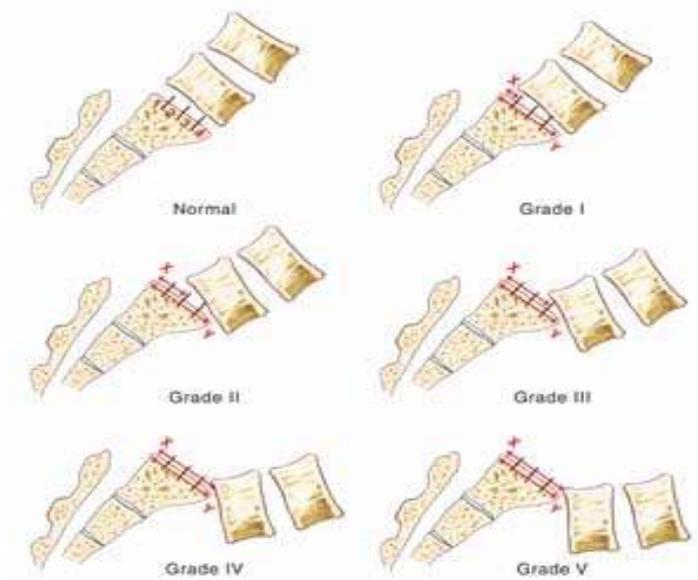


Abb. 4: Skizze Spondylolisthese Grad-Einteilung nach Meyerding (Colorado Comprehensive Spine Institute 2016).

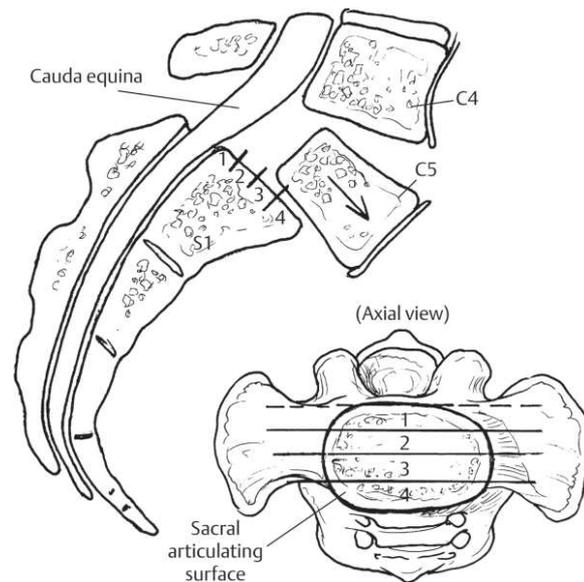


Abb. 5: Skizze Spondylolisthesis Grad-Einteilung nach Meyerding in lateraler und axialer Ansicht des Sakrums (Gebauer et al. 2016).

1.1.2.2 Klassifikation nach Newman und Wiltse

Des Weiteren kann eine Spondylolisthesis nach der Entstehung klassifiziert werden. Diese Klassifikation wurde nach Newman und Wiltse (Wiltse 1975; Wiltse et al. 1976) entwickelt und modifiziert. 1989 wurde die Klassifikation um eine Gruppe, die postoperative Spondylolisthesis, erweitert (Tab. 1).

I	dysplastisch (kongenital) a) axiale Ausrichtung der Gelenkfortsätze b) sagittale Ausrichtung c) andere kongenitale Anomalien
II	isthmisch a) Lyse Pars interarticularis b) sekundäre Elongation c) akute Pars-interarticularis-Fraktur
III	degenerativ
IV	posttraumatisch
V	pathologisch
VI	postoperativ / iatrogen

Tab. 1: Klassifikation Spondylolisthesis, modifiziert nach Wiltse (Wiltse 1975) und Newman (Wiltse et al. 1976).

Die Spondylolisthesis vom isthmischen Typ (Typ II) ist vor allem bei Patienten unter 50 Jahren die häufigste Art dieses Erscheinungsbildes. Sie ist nicht kongenital zu verstehen, somit nicht bereits von Geburt an vorhanden. Insgesamt ist jedoch der degenerative Typ am häufigsten (Wiltse 1975). In meiner Dissertation wird vor allem

auf die isthmische und dysplastische Art von Spondylolisthese sowie insbesondere auf die hochgradige Olisthese das Augenmerk gelegt.

1.1.2.3 Klassifikation nach Mac-Thiong und Labelle

Mac-Thiong und Labelle entwickelten zusammen mit einem wissenschaftlichen Team eine neue Klassifikation, die acht unterschiedliche Typen einer lumbosakralen Spondylolisthese beschreibt. Diese basieren auf der Gradeinteilung nach Meyerding (gering- und hochgradiges Gleiten), dem Grad der Dysplasie nach Wiltse sowie den Parametern der sagittalen sakro-pelvinen Balance, die sich in den vergangenen Jahren als sehr wichtig im Bezug auf das operative Ergebnis zeigten (siehe Abb. 6) (Mac-Thiong und Labelle 2006; Mac-Thiong et al. 2008b). Zwischen dem Schweregrad der Dysplasie und dem Listheseegrad zeigt sich eine starke positive Korrelation ($r = 0.63$), somit steigt der Schweregrad der Listhese mit Zunahme der Dysplasie (Pawar et al. 2012). Unterschieden werden vornehmlich Spondylolisthesen mit balancierter und nicht-balancierter spino-pelviner Einheit.

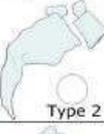
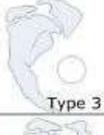
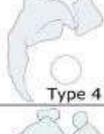
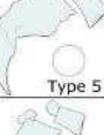
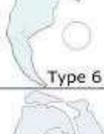
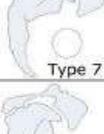
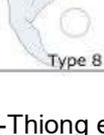
Grade	Dysplasia	Sacro-pelvic balance	Example
Low-grade ($< 50\%$ slip)	Low-dysplastic <ul style="list-style-type: none"> Minimal lumbosacral kyphosis Almost rectangular L5 Minimal sacral doming Relatively normal sacrum Minimal posterior elements dysplasia (e.g. spina bifida occulta) Relatively normal transverse processes 	Low PI/low SS <ul style="list-style-type: none"> Sacral slope $\leq 40^\circ$ 	 Type 1
		High PI/high SS <ul style="list-style-type: none"> Sacral slope $> 40^\circ$ 	 Type 2
	High-dysplastic <ul style="list-style-type: none"> Lumbosacral kyphosis Trapezoidal L5 Sacral doming Sacral dysplasia and kyphosis Posterior elements dysplasia Small transverse processes 	Low PI/low SS <ul style="list-style-type: none"> Sacral slope $\leq 40^\circ$ 	 Type 3
		High PI/high SS <ul style="list-style-type: none"> Sacral slope $> 40^\circ$ 	 Type 4
High-grade ($\geq 50\%$ slip)	Low-dysplastic <ul style="list-style-type: none"> Minimal lumbosacral kyphosis Almost rectangular L5 Minimal sacral doming Relatively normal sacrum Minimal posterior elements dysplasia (e.g. spina bifida occulta) Relatively normal transverse processes 	High SS/low PT (balanced pelvis) <ul style="list-style-type: none"> Balanced sacrum Sacral slope $\geq 50^\circ$ Pelvic tilt $\leq 35^\circ$ 	 Type 5
		Low SS/high PT (unbalanced pelvis) <ul style="list-style-type: none"> Vertical sacrum Sacral slope $< 50^\circ$ Pelvic tilt $\geq 25^\circ$ 	 Type 6
	High-dysplastic <ul style="list-style-type: none"> Lumbosacral kyphosis Trapezoidal L5 Sacral doming Sacral dysplasia and kyphosis Posterior elements dysplasia Small transverse processes 	High SS/low PT (balanced pelvis) <ul style="list-style-type: none"> Balanced sacrum Sacral slope $\geq 50^\circ$ Pelvic tilt $\leq 35^\circ$ 	 Type 7
		Low SS/high PT (unbalanced pelvis) <ul style="list-style-type: none"> Vertical sacrum Sacral slope $< 50^\circ$ Pelvic tilt $\geq 25^\circ$ 	 Type 8

Abb. 6: Klassifikation der Spondylolisthese nach Mac-Thiong et al. (Mac-Thiong et al. 2008b).

Aufgrund der nur mittelmäßigen Zuverlässigkeit der neuen Klassifikation in einer Studie wurde diese durch die Spinal Deformity Study Group (SDSG) vereinfacht und optimiert. Dabei wurde folgende neue Klassifikation zur Einteilung von Spondylolisthesen und einer besseren Entscheidungsfindung der optimalen Therapie anhand des Schweregrades der Listhese entwickelt (siehe Tab. 2) (Mac-Thiong et al. 2008b; Labelle et al. 2011).

L5-S1 Spondylolisthese	Low grade	Typ 1	PI < 45° (nutcracker)
		Typ 2	PI 45 – 60°
		Typ 3	PI > 60°
	High grade	Typ 4	Balanced Pelvis
Retroverted Pelvis		Typ 5: balanced spine	
		Typ 6: unbalanced spine	

Tab. 2: Spondylolisthesen-Klassifikation basierend auf dem spino-pelvinen Alignment nach Spinal Deformity Study Group (Labelle et al. 2011; Mac-Thiong et al. 2008b).

1.1.3 Diagnostik

1.1.3.1 Klinisches Erscheinungsbild

Die klinische Symptomatik stellt sich vor allem in drei Hauptpunkten dar: Lumbalgie, Ischialgie sowie Veränderungen des sagittalen Profils. Die Lumbalgie entsteht meist unter körperlicher Belastung sowie längerem Stehen und Sitzen, meist als erstes Symptom einer Spondylolisthese, teils auch mit ausstrahlenden Schmerzen über das Gesäß bis in den Oberschenkel. Davon zu unterscheiden sind radikuläre Schmerzen durch Irritation einer Nervenwurzel, die evtl. parallel zur Spondylolisthese meist im Rahmen einer Bandscheibenprotrusion und Neuroforamenenge einhergehen. Die Ischialgie tritt meist bei fortgeschrittener Spondylolisthese auf und zeigt sich u. a. mit neurologischen Ausfallerscheinungen. Hier ist oft ein Ausfall der Nervenwurzel (L4-) L5 mit Fußheberschwäche zu sehen. Seltener ist ein Ausfall der Nervenwurzel S1, der zu einer Fußsenkerschwäche führen kann, da eine Doppelinnervierung der Fußmuskeln durch die Nervenwurzeln L5 und S1 besteht. Im schlimmsten Fall kann es hierbei durch das Abrutschen des Wirbelkörpers zur Kompression des Wirbelkanals zu einer Spinalkanalstenose kommen, was eine Cauda-equina-Symptomatik mit Blasen- und Mastdarmschwäche sowie Hüftlendenstrecksteife zur Folge haben kann.

Klinisch auffällig wird eine Spondylolisthesis im Kindes- und Pubertätsalter durch belastungsabhängige Schmerzen. Hierbei zeigt sich bei der Inspektion das sogenannte Sprungschancenphänomen, eine tastbare Stufe der Dornfortsätze des Wirbelkörpers in Höhe des abgleitenden Wirbelkörpers im lumbo-sakralen Übergang, welche durch das Abgleiten des Wirbelkörpers nach ventral entsteht. Diese Stufe ist vor allem bei Zunahme der Spondylolithesis tastbar. Hier kann man auch ein hervorstehendes Sakrum tasten.

Das Erscheinungsbild im Stehen zeigt eine Hyperlordose (umgspr. Hohlkreuz) sowie eine Retroversion des Beckens. Außerdem sind eine Flexion im Kniegelenk und eine Hyperextension im Hüftgelenk sichtbar. Die Hüftlendenstrecksteife, die durch die Verkürzung und Verspannung der ischiokruralen Muskulatur durch Irritation der L5-Nervenwurzel entsteht, lässt sich mittels Lasegué testen. Dieser Test ist positiv, wenn sich die kontralaterale Hüfte reflektorisch bei dem am Rücken liegenden Patienten bei Flexion des Beines im Hüftgelenk anhebt. Dies zeigt eine eingeschränkte Hüftflexion (AMBOSS GmbH 2020).

Die hochgradige Spondylolisthesis wird oft erst (zu) spät erkannt und zeigt bereits skoliotische Veränderungen der Wirbelsäule oder neurologische Defizite (Meier et al. 2010, S. 388, S. 391).

1.1.3.2 Bildgebung

Zur Diagnosestellung sind vor allem Röntgenbilder der Wirbelsäule nötig.



Abb. 7: Morphologische Merkmale einer Spondylolisthesis: links - Seitliche Aufnahme, domförmiges Sakrum und trapezoider Lendenwirbelkörper L5 bei Spondylolisthesis Grad 4 nach Meyerding; rechts - a.p.-Aufnahme, "umgekehrter Napoleonhut": L5 wird vor das Sakrum projiziert durch das Abgleiten des Wirbelkörpers (eigenes Bildmaterial)

Die laterale Aufnahme der Wirbelsäule zeigt das Abgleiten des Wirbelkörpers, siehe Abb. 7 links. Im anterior-posterioren (a. p.) Strahlengang kann man den 5. Lendenwirbelkörper vor dem Sakrum projiziert sehen. Diese Anordnung nennt man ‚umgekehrter Napoleonhut‘, siehe Abb. 7 rechts. Eine Aufnahme der ganzen Wirbelsäule einschließlich der Hüftgelenke in zwei Ebenen ist nötig, um die Gesamtstatik beurteilen zu können und diese hinsichtlich einer skoliotischen Veränderung oder anderen begleitenden Pathologien zu untersuchen. Mittels der abgebildeten Hüftköpfe und des Lendenwirbelbereichs in einer lateralen Aufnahme kann man das spino-pelvine Gleichgewicht ermitteln, was im Verlauf näher erläutert wird. In der radiologischen Aufnahme kann man weitere morphologische Veränderungen der Wirbelkörper sehen, die mit einer hochgradigen Spondylolisthesis einhergehen, z. B. einer trapezoiden Verformung des L5, einer domförmigen Verformung des S1, dysplastische Facettengelenke, Elongation der Pars interarticularis und Spondylolyse (Meier et al. 2010, S. 388).

Eine Spondylolyse zeigt sich im Röntgenbild als Figur eines Hundes auf den Wirbelkörper projiziert. Die Lyse-Zone ist als „Hunde-Halsband“ in der Röntgenaufnahme als eine nicht röntgendichte Struktur (dunkler im Vgl. zu hellem Knochen) zu sehen, siehe Abb. 8.

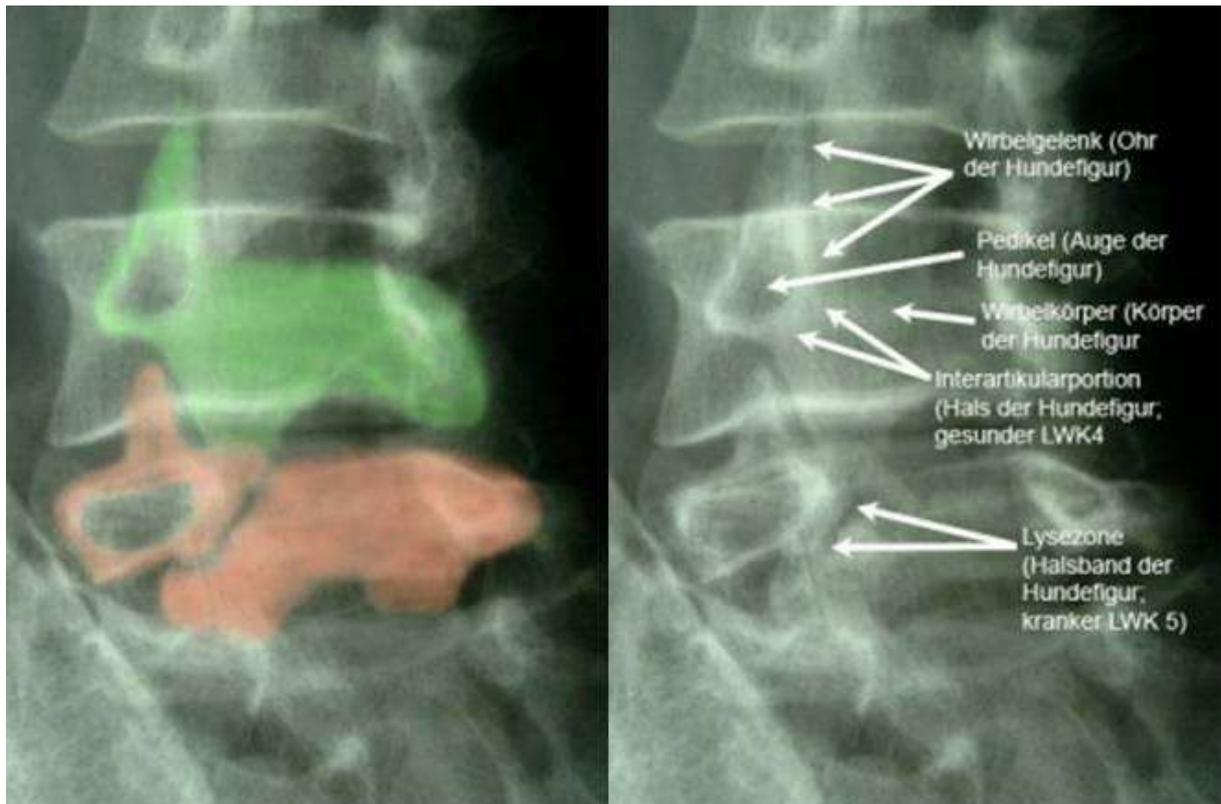


Abb. 8: Spondylolysis als "Hundehalsband" in der lat. Projektion einer konventionellen Röntgenaufnahme (Szeifert 2015).

Eine MRT- und CT-graphische Bildgebung wird genutzt, um eventuelle degenerative Veränderungen der Wirbelsäule vor allem bei Erwachsenen – z. B. den Zustand der Bandscheiben im Lendenwirbelbereich oder mögliche Engstellen an den Nervenaustrittsstellen – beurteilen zu können. Dies ist bei der Planung der operativen Versorgung wichtig, da man ggf. weitere Segmente in die Fusion einschließen kann / muss.

Funktionsaufnahmen werden zur besseren Beurteilung der knöchernen Situation im Bezug auf das Rückenmark (Myelographie) angefertigt (siehe Abb. 9).



Abb. 9: Beispielbild einer Myelographie (MRT in T2) (eigenes Bildmaterial)

Es werden weitere Röntgenbilder in Inklination und Reklination der Lendenwirbelsäule angefertigt, um die Mobilität der Wirbelsäule präoperativ festzuhalten und zu beurteilen (siehe Abb. 10).



Abb. 10: Röntgenbilder in Inklination und Reklination (eigenes Bildmaterial)

1.1.4 Therapie

Je nach Ausmaß der klinischen Beschwerden, der Ausprägung der radiologisch klassifizierbaren Spondylolisthesis und des Alters des Patienten wird eine passende Therapie evaluiert.

1.1.4.1 Konservative Therapie

Vor allem bei geringgradigen Spondylolisthesen (Grad 1 und 2 nach Meyerding) wird empfohlen, nach ausreichender Diagnostik die Schmerzsymptomatik und Statik der Wirbelsäule mittels Physiotherapie und Rückenschule sowie angepasster Schmerztherapie zu behandeln. Es ist vor allem wichtig, die Muskulatur des Rückens ausreichend aufzubauen, um das Abgleiten des Wirbelkörpers aufzuhalten oder zu verbessern, und damit den geschwächten Bandapparat um die Wirbelsäule auszugleichen.

1.1.4.2 Operative Therapie

Ziel der operativen Therapie ist die Wiederherstellung des sagittalen Profils, das bedeutet ein physiologisches Wirbelsäulen-Alignment im Gleichgewicht. Hierdurch verbessert sich auch die globale spino-pelvine Balance. Allgemein gesprochen wird durch die Reposition und Fusion des abgleitenden Wirbelkörpers mit mindestens einem weiteren Wirbelkörper und einhergehender Korrektur die lumbosakrale Kyphosierung, die Hyperlordose (Hohlkreuz) des Lendenwirbelbereichs sowie der thorakale Flachrücken ausgeglichen. Die Position des Beckens verbessert sich dadurch, damit einer Hüftstrecksteife entgegengewirkt werden kann und ein physiologisches Standbild entsteht. Des Weiteren sind eine Schmerzlinderung, eine kosmetische Verbesserung und das Vermeiden bzw. die Reduktion / komplette Remission neurologischer Defizite zu erreichen (Meier et al. 2010). Zudem wird auch das Risiko für fortschreitenden Verschleiß der Anschlusssegmente der Wirbelsäule durch die Reposition in eine physiologische Position gemindert.

Es gibt verschiedene operative Herangehensweisen, die sich vor allem im zeitlichen Ablauf sowie anhand eines intraoperativen Lagewechsels unterscheiden. Diese sind abhängig vom Schweregrad der Spondylolisthesis, der verbleibenden Mobilität der (Lenden-) Wirbelsäule und den Komorbiditäten wie z. B. skoliotische Veränderungen der Wirbelsäule.

Die Grundregel der operativen Versorgung von Spondylolisthesen lautet folgendermaßen: Der Fusionsabschnitt muss möglichst kurzstreckig sein, im besten Fall nur 1 Segment L5/S1, um die Bewegungsfähigkeit so wenig wie möglich unnötig einzuschränken, jedoch so lang wie nötig, um ausreichend Stabilität zu etablieren, um die Korrektur postoperativ dauerhaft zu halten, bis eine Fusion der Wirbel, die Spondylodese, eingetreten ist.

Spondylodese bezeichnet eine Reposition und Fusionierung der Wirbelkörper durch Implantation von Schrauben über die Wirbelpedikel (siehe Abb. 11 links) sowie eine Verbindung der Schrauben durch axiale Stäbe aus Titan jeweils seitlich der Wirbelsäule miteinander, sodass die Wirbelkörper an einer weiteren Dislokation gehindert werden, siehe Abb. 11 Mitte / rechts.

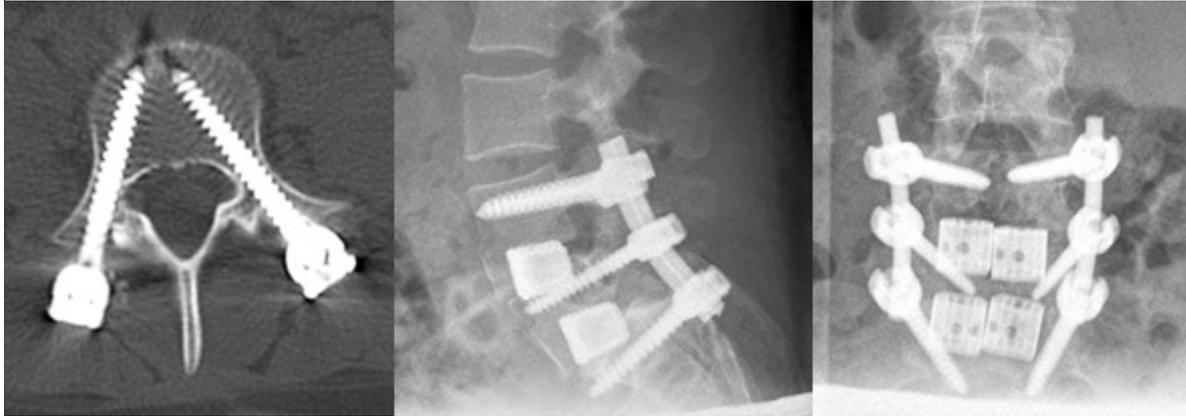


Abb. 11: links: Pedikelschrauben, Mitte/rechts: Beispiele für lumbale Spondylodese mit Cage von lateral und dorsal projiziert (eigenes Bildmaterial)

Das Grundprinzip der OP besteht aus mehreren Arbeitsschritten: Dekompression der Neuroforamina und Pars interarticularis (Lysespalt) und Darstellung der Nervenwurzel L5; dorsale Instrumentation von L5-S1 sowie ggf. der Anschlusssegmente L4 und S2; ventrale Fusion von mind. 2 Wirbelkörpern (meist L5 und S1) mittels Osteotomie der domförmigen Deckplatte des Sakrums und Anfrischen der Grundplatte von L5, ventrales Einbringen eines Spongiosa-gefüllten Cage als Platzhalter bei Spondylodissektomie (Entfernung der Bandscheibe).

Ein Beispiel der Spondylodese mit Fixateur intern von L4 bis S1 und Cage-Implantation in zwischen L4/5 und L5/S1 ist in der Schema-Skizze Abb. 12 zu sehen.

Bei der Fusion der Wirbelkörper wird zwischen drei verschiedenen Herangehensweisen unterschieden: Anterior Lumbar Interbody Fusion (ALIF), Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF) und Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF) (Meier et al. 2010). Somit kann die intersomatische Fusion über einen ventralen oder dorsalen Zugang erfolgen.

Die Wahl des OP-Verfahrens wird in Abhängigkeit der Ausprägung des Wirbelgleitens gefällt. Hierzu wird der Listhesegrad nach Meyerding, die (Rest-) Mobilität der Wirbelsäule und die Kyphosierung beurteilt.



Abb. 12: Skizze Spondylodese: Fixateur intern von L4 auf S1 mit Pedikelschrauben und axialen Stäben, sowie Cage-Implantation (Min 2015).

1.1.4.2.1 Einfache Spondylodese (D-V)

Bei geringgradiger Listhese, ausreichender Restmobilität und geringer Kyphosierung kann eine dorsale Spondylodese mit Reposition des abgleitenden Wirbelkörpers durchgeführt werden, die ventrale Cage-Einbringung und Fusion kann über ALIF, PLIF oder TLIF erfolgen. Das Verfahren der dorso-ventralen Spondylodese (D-V), findet als einzeitige Operation mit intraoperativer Umlagerung von primärer Bauchlage (dorsaler Zugang) auf Rückenlage (ventraler Zugang) des Patienten statt (Meier et al. 2010, S. 393–399).

1.1.4.2.2 Kombinierte ventrodorsale Repositionsspondylodese (V-D)

Bei höhergradiger und rigider Listhese mit nur geringer Rest-Mobilität sollte eine kombinierte, ventrodorsale Repositionsspondylodese durchgeführt werden. Hierbei wird über einen ventralen Zugang (retro- oder transperitoneal) nach Präparation, Mobilisation und Schonung des Ureters und der Iliakalgefäße das ventrale Release (Auslösung / Lockerung / Entlastung) durchgeführt. Dabei werden die Vorderkante und die Grundplatte von L5 bei trapezoider Verformung des Wirbelkörpers osteotomiert als auch die Bandscheibe zwischen L5 und S1 komplett reseziert. Des Weiteren kann man in dieser Position die Osteotomie der domförmig veränderten S1-Deckplatte durchführen. Nach Umlagerung des Patienten in Bauchlage kann eine Distraction (Auseinanderziehen) von dorsal zwischen L3/L4 und S1 vorgenommen werden, um eine Reposition von L5 zu erreichen. Hierbei werden Pedikelschrauben in L4-S1 gesetzt (poly- oder monoaxial in L5 und S1, polyaxiale in L4), um sie mit einem bereits in Lordose vorgebogenen Stab zu verbinden und L5 in der richtigen Position zu fixieren. Das leere Bandscheibenfach zwischen L5 und S1 wird nun mit Spongiosa des Beckenkamms aufgefüllt sowie mit Titan-Cages als Platzhalter zur Fusion eingebracht. Dieses kann entweder durch den bereits zuvor erarbeiteten ventralen Zugang mittels ALIF oder durch das PLIF- / TLIF-Verfahren von dorsal durchgeführt werden (Meier et al. 2010, S. 393–399).

1.1.4.2.3 Gaines-Verfahren mit Korporektomie (V-D-V-Spondylodese)

Im Falle einer Spondyloptose kann das Gaines-Verfahren als auch modifizierte Varianten durchgeführt werden, die eine ventro-dorso-ventrale Spondylodese (V-D-V) mit vollständiger oder partieller Korporektomie von L5 bezeichnet. Dieses zeichnet sich durch die komplette oder partielle Entfernung des tief ins Becken abgeglittenen L5 aus, sowie einer Spondylodese / Fusion von L4 auf S1, ggf. erweitert von L3, mit Instrumentation von dorsal und Cage-Implantation von ventral. Hierbei ist ein zweimaliger intraoperativer Lagewechsel des Patienten nötig (Meier et al. 2010, S. 393–399; Gaines und Nichols 1985). Eine Skizze des OP-Verfahrens sowie ein radiologisches Beispiel ist in Abb. 13 und Abb. 14 zu sehen.

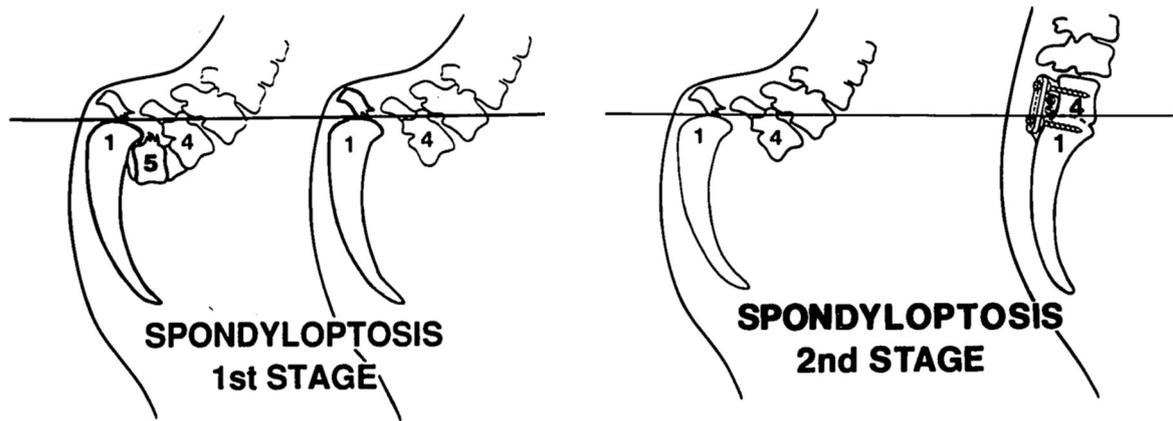


Abb. 13: Gaines-Verfahren (1985) mit L5-Korporektomie (Stufe 1 von ventral) und Reposition mit Spondylodese von L4 auf S1 (Stufe 2 von dorsal) (Lehmer et al. 1994; Gaines 2005).

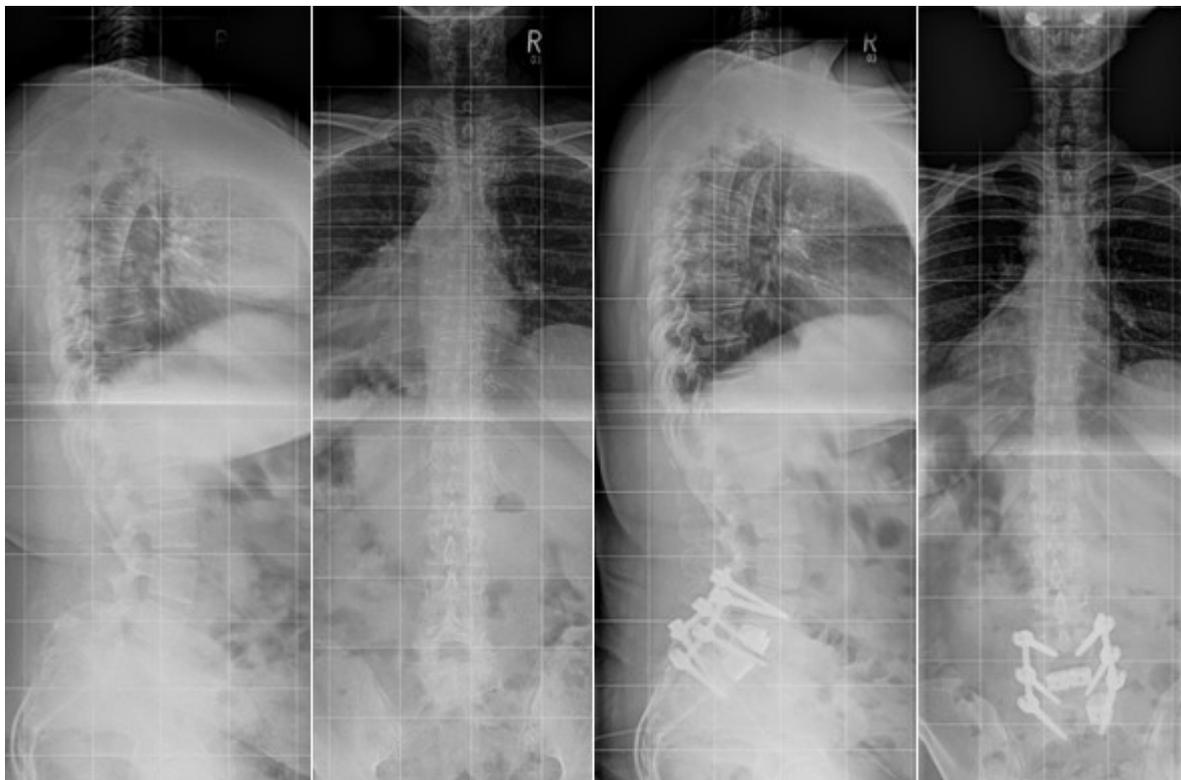


Abb. 14: Präoperative und postoperative Röntgen-Aufnahmen einer Patientin mit Korporektomie und Cage-Ersatz (eigenes Bildmaterial)

1.1.4.2.4 Nachbehandlung

Zur perioperativen / postoperativen Schonung der Spondylodese (Schrauben, Naht etc.) bis zur ausreichenden knöchernen Konsolidierung hin zur abschließenden Wundheilung wird empfohlen, das tiefe Sitzen für sechs Wochen zu vermeiden sowie vier Monate ein Mieder zu tragen.

1.1.4.2.5 Risiken und Komplikationen

Die OP einer Spondylolisthese ist oft sehr aufwendig und mit gewissen Risiken und Komplikationen behaftet. Die Schwierigkeit, die komplette Reposition operativ zu erreichen, steigt mit dem Lebensalter und der Rigidität zwischen L5 und S1 ebenso wie das Komplikationsrisiko.

Eine komplette Reposition des Wirbelkörpers ist aufgrund der Schwere des Abgleitens teilweise nicht möglich. Dies kann eine erweiterte Instrumentation bis L4 erforderlich machen, d. h. eine Fusion von insgesamt drei Wirbelkörpern, aufgrund einer möglichen Anschlussinstabilität nach L5/S1-Fusion oder bei bereits degenerativ veränderter Bandscheibe L4/L5. Gegebenenfalls ist eine spätere Metallentfernung im Verlauf nötig (Meier et al. 2010).

Zu den allgemeinen OP-Risiken und Komplikationen gehören Blutungen und Nachblutungen, Verletzung von Nerven und anderen benachbarten Strukturen im OP-Gebiet sowie Wundinfektionen, Wundheilungsstörungen und Wunddehiszenz.

Zu den häufigsten perioperativen Komplikationen zählt das neurologische Defizit, vor allem der Nervenwurzel L5, die bei Reposition höhergradiger Spondylolisthesen zu Fußheberparese führen kann. Der Großteil der Muskelschwächen ist nur temporär, jedoch gilt im Allgemeinen: Je ausgeprägter der Listhesegrad, desto höher ist das Risiko für neurologische Komplikationen. Bei Schädigung oder Reizung der Nervenwurzel S1 kann es zu einer Fußsenkerschwäche kommen. In seltenen Fällen kann es zu einer Reizung des Plexus lumbalis kommen, welches sich in Radikulopathien des Nervus femoralis zeigt. Ebenso kann es zu Blasen- und Mastdarmstörungen kommen. Parästhesien bzw. Hypästhesien im Dermatome L4-L5 gehören in einigen Fällen zu den persistierenden Komplikationen. Bei unzureichender Thromboseprophylaxe, körperlichen Risikofaktoren (Rauchen, orale Kontrazeption, weiblich) und mangelnder Mobilisation kann es in seltenen Fällen zu einer tiefen Beinvenenthrombose (TVT) kommen.

Bei ventralen Eingriffen kann es aufgrund einer Läsion des Plexus sympathicus prä-sacral zu einer retrograden Ejakulationsstörung kommen.

Zu den Spätkomplikationen (min. 6 Monate nach OP) gehören Pseudarthrosen (PA), die sich durch unzureichende, knöcherne Konsolidierung der Fusionsstrecke nach frühestens sechs Monaten zeigen. Ebenso kann es zu Korrekturverlust der Reposition und Implantatversagen (z. B. Schrauben- oder Stab-Bruch) kommen. Hier ist eine erneute operative Versorgung mit Implantatentfernung nötig, ggf. Anfrischung der Knochen-Fusionsstellen und erneute Instrumentierung bzw. ggf. Erweiterung der Spondylodese, um das Korrekturergebnis der Wirbelsäule in sagittaler und spinopelviner Balance zu erhalten bzw. zu verbessern.

Das Risiko der PA ist bei kompletter Reposition aufgrund verbesserter Statik zur Knochenheilung und größerer Fläche für die Spondylodese geringer (Meier et al. 2010).

Die Komplikationen können nach einer Klassifikation nach Glassman (Glassman et al. 2007, S. 2765, Tab.1) in Minor- und Major-Komplikationen sowie nach dem Zeitpunkt des Auftretens in Bezug zur Operation, intraoperativ, postoperativ und zum Nachuntersuchungszeitpunkt, eingeteilt werden.

1.2 Aktueller Stand der Wissenschaft

Nach aktuellem Stand der Forschung wird die operative Versorgung, vor allem der hochgradigen Spondylolisthesen und -loptosen besonders kontrovers diskutiert, da hier trotz einer Vielzahl an Studien viele verschiedene Meinungen vorherrschen bezüglich einer optimalen operativen Versorgung mit Verringerung der Komplikationsrate. Diese Studien schließen häufig jedoch nur ein kleines und / oder heterogenes Patientenkollektiv ein oder weisen Limitationen im Bereich der Analyse des globalen sagittalen Alignments auf.

1.2.1 Sagittale und spino-pelvine Balance

Jean Dubousset hat 1998 in seinem „Cone of economy“-Konzept den Begriff ‚sagittale Balance‘ als eine Situation beschrieben, in der das Individuum in der Lage ist, ein stabiles Stehen bei optimaler Ausrichtung in den drei Ebenen (coronar, sagittal und axial) mit einem Minimum an Aufwand der betroffenen Muskulatur aufrechtzuerhalten. Es ist ein Zusammenwirken der Knochenmorphologie (Becken und Wirbelsäule), das mechanische Verhalten von Bandscheibe und Bandapparat, Muskelkraft bzw. -widerstandsfähigkeit und der Fähigkeit der Ausführung von Kompensationsmechanismen (Rauschmann et al. 2017).

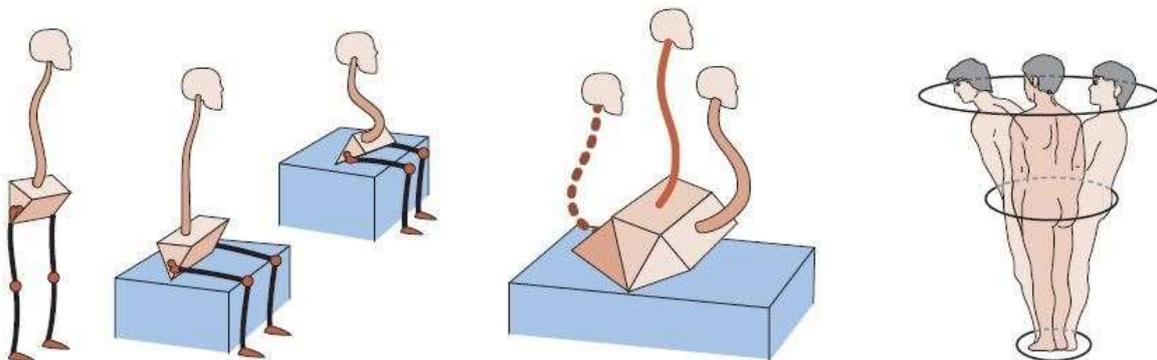


Abb. 15: Darstellung von Dubousset: 'Cone of Economy', welches das Becken und die Wirbelsäule als Teträeder darstellt und hiermit die ergonomische Stellung des Körpers in der Balance im Raum verdeutlicht in verschiedenen Positionen. (Koller et al. 2009, S. 282)

Ein sagittales Alignment beschreibt die Ausrichtung der Wirbelsäule in der seitlichen Ansicht. Zur exakten Beurteilung der sagittalen und spino-pelvinen Balance benötigt man ein seitliches Röntgenbild der gesamten Wirbelsäule mit abgebildetem Becken und Hüftköpfe im Stehen.

Beispielhaft ist im Folgenden eine Bilderserie eines Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis IV° nach Meyerding zu sehen. Diese Röntgenaufnahmen wurden präoperativ zur Klassifizierung, Messung und OP-Planung angefertigt, siehe Abb. 16.



Abb. 16: Präoperative Bild-Serie der Wirbelsäule eines 16-jährigen männlichen Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis IV° nach Meyerding; links - anterior-posteriorer Strahlengang; rechts - sagittaler / lateraler Strahlengang (eigenes Bildmaterial)

Die spino-pelvine Balance beschreibt die Position der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte untereinander sowie zum Becken, die für das Verständnis der Diagnostik und Therapie von Wirbelsäulen-Deformitäten von großer Bedeutung sind. Für die Bestimmung der spino-pelvinen Balance benötigt man drei Parameter, welche die Stellung von Becken und Hüfte sowie der Wirbelsäule zueinander beschreiben:

Sakrumkipfung / Beckenneigung (sacral slope, SS) ist der Winkel zwischen der Sakrum-Deckplatte und einer horizontalen Hilfslinie, die am dorsalen Ende des Sakrums angebracht ist, bei lateraler Ansicht der LWS (siehe Abb. 19). Publierte Normwerte: $43.2^\circ \pm 8.4^\circ$ bei Frauen und $41^\circ \pm 8.5^\circ$ bei Männern (Boulay et al. 2006). Labelle, Roussouly et al. zeigen für Gesunde einen Normwert $39.7^\circ \pm 4.1^\circ$ sowie bei Spondylolisthesen $49.4^\circ \pm 5.9^\circ$ (Labelle et al. 2004).

Die Beckenrotation (pelvic tilt, PT) lässt sich durch den Winkel zwischen der Mitte der Hüftkopf-Verbindungsline und einer vertikalen Hilfslinie zur Mitte der Sakrum-Deckplatte bestimmen (siehe Abb. 19). Es beschreibt die Ante- und Retroversion des Beckens um das Hüftgelenk und ist lageabhängig (Decker et al. 2016, S. 130). Normwerte: $13.6^\circ \pm 6^\circ$ bei Frauen, $13^\circ \pm 6^\circ$ bei Männer (Boulay et al. 2006). Labelle, Roussouly et al. haben einen Normwert für Gesunde von $12.1^\circ \pm 3.2^\circ$ ermittelt, bei Spondylolisthese ist der PT-Winkel $22.2^\circ \pm 6.3^\circ$, ansteigend mit dem Grad der Listhese (Labelle et al. 2004). Eine PT-Erhöhung wird bei der Retroversion des Beckens erreicht und tritt als energieverbrauchender Kompensationsmechanismus bei Ventralverschiebung der Wirbelsäule auf. Werte über 20° erhöhen das Risiko für eine deutlich eingeschränkte Lebensqualität (Decker et al. 2016, S. 130).

Der pelvine Inzidenzwinkel (pelvic incidence, PI) beschreibt den Winkel zwischen der Verbindungsline der Hüftkopf-Zentren und dem Lot zur Mitte der Sakrum-Deckplatte (siehe Abb. 19). Damit wird die Stellung des Sakrums im Becken bzw. die Position des Beckens selbst beschrieben. PI ist nach Duval-Beaupère et al. (1998) ein individueller, konstanter, morphologischer Parameter, der sich nach abgeschlossenem Wachstum lebenslang nicht mehr verändert. Die Parameter SS und PT ergeben zusammen PI ($\rightarrow PI = SS + PT$) und sind somit wichtige Parameter zur Bestimmung der Becken-Stellung. Somit bewirkt z. B. eine Veränderung von SS ebenfalls eine Veränderung von PT bei konstantem PI. Normwerte für PI: $56^\circ \pm 10^\circ$ bei Frauen, $53^\circ \pm 10.6^\circ$ bei Männern (Legaye et al. 1998). Labelle, Roussouly et al. haben folgende Werte für PI bei Gesunden ermittelt: $51.8^\circ \pm 5.3^\circ$. Bei Spondylolisthese ergeben sich folgende Werte für PI: $71.6^\circ \pm 7.7^\circ$. Hier zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen spino-pelviner Balance und Dysbalance (Labelle et al. 2004). Nach Labelle, Roussouly et al. variieren die Werte für PI zwischen 35° und 85° (Labelle et al. 2005, S. 5).

Mac-Thiong et al. konnte in einer weiteren Studie an asymptomatischen Erwachsenen keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf Alter und Geschlecht bei PI, PT und SS sehen (Mac-Thiong et al. 2011a).

PT und SS sind variable, positionelle Parameter und stellen die Veränderungen des Beckens und der sagittalen Balance dar. Sie sind durch Körperhaltung, Muskeltonus und Statik der unteren Extremitäten beeinflussbar. PT und SS beeinflussen sich kontrovers, d. h. bei Zunahme der Beckenanteversion steigt SS an und PT fällt reflektorisch ab. Bei Beckenretroversion (z. B. kompensatorisch bei Imbalance) sinkt SS und PT steigt (Pingel et al. 2018). Interessanterweise sind die Parameter für PI, SS sowie LL bei Spondyloptosen im Vergleich zu niedrigeren Spondylolisthese-Graden leicht rückläufig. Hierfür kann die domförmige Veränderung des Sakrums und die unter Umständen damit einhergehende erschwerte Messgenauigkeit verursachend sein (Labelle et al. 2004).

Nach Tyrakowski erhält man gleichwertige Ergebnisse bei der Bestimmung von PI und PT, wenn man die Messung an den Hüftköpfen oder an den Azetabulumgewölben vornimmt (Tyrakowski et al. 2015).

Die spinalen Parameter zeigen die Beurteilung der globalen Balance in sagittaler Ebene. Das Verhältnis zwischen Lumballordose und Thorakalkyphose ist von Bedeutung für eine „normale“ sagittale Wirbelsäulenkrümmung.

Die Lumbale Lordose (LL) zeigt den Winkel zwischen den Deckplatten von L1 und L5. Normwerte nach Labelle und Roussouly sind für Gesunde $42.7^\circ \pm 5.4^\circ$. Bei Patienten mit Spondylolisthese schwankt der Wert für LL je nach Grad der Olisthese bei $66^\circ \pm 8.7^\circ$, am höchsten bei Grad 4 nach Meyerding und regredient bei einer Spondyloptose (Labelle et al. 2004). Die LL korreliert stark mit PI, sodass LL bei hoher PI ebenso ansteigt (Faustregel: $LL = PI+9$) (Legaye et al. 1998; Vaz et al. 2002; Boulay et al. 2006).

Die Thorakale Kyphose (TK) wird am Winkel zwischen den Wirbelkörpern T4 und T12 gemessen. Nach Labelle und Roussouly wurde bei Gesunden ein Wert von $47.5^\circ \pm 4.8^\circ$ gemessen. Bei Spondylolisthesen wurde ein Winkel von $38.9^\circ \pm 6.3^\circ$ gemessen, wobei die höchste TK bei Listhesegrad 1 und 4 ermittelt wurde (Labelle et al. 2004).

Mac-Thiong et al. beschreibt einen tendenziellen Anstieg von TK und LL sowie PI und PT in Abhängigkeit mit dem Alter während des Wachstums in der Kindheit und Jugend. SS zeigt sich jedoch relativ stabil während der Wachstumsphase (Mac-Thiong et al. 2004; Mac-Thiong et al. 2011b). Hier beschreibt er zudem Normwerte der sagittalen und spino-pelvinen Parameter bei gesunden Kindern und Jugendlichen: PI $49.1^\circ \pm 11.0^\circ$, PT $7.7^\circ \pm 8.0^\circ$; SS $41.4^\circ \pm 8.2^\circ$; LL $48.0^\circ \pm 11.7^\circ$; TK $44.0^\circ \pm 10.9^\circ$ (Mac-Thiong et al. 2007).

Bei zunehmender Spondylolisthese zeigt sich ein signifikanter Anstieg von PI, SS, PT und LL, während TK signifikant niedriger ist im Vergleich zur gesunden Normalbevölkerung (Labelle et al. 2005).

Das C7-Lot beschreibt die Schwerpunktlinie des Körpers bzw. der Wirbelsäule von Wirbelkörper C7 ausgehend bei einer freistehenden Person. Bei sagittaler Balance fällt diese Linie hinter L3, schneidet den hinteren Anteil von S1 und verläuft hinter der Hüftgelenksachse vorbei. Bei strukturellen (knöchern) oder funktionellen (muskulär) Fehlstellungen der Wirbelsäule bzw. einzelner Wirbelsäulenabschnitte kann es zu einer C7-Lot-Verlagerung kommen. Eine positive sagittale Imbalance liegt bei einer Verlagerung von C7-Lot $>5\text{cm}$ ventral der S1-Hinterkante vor. Sofern das C7-Lot ventral der Hüftgelenksachse liegt, spricht man von einer dekompenzierten sagittalen Imbalance (Ferraris et al. 2012). Mac-Thiong analysierte, dass das C7-Lot bei Kindern und Jugendlichen häufig vor der Hüftkopf-Achse sowie dem Sakrum verläuft (29 % bei 3 bis 10-Jährigen; 12 % bei 10 bis 18-Jährigen). Bei einem zunehmenden Ventralbewegen der C7-Linie besteht das Risiko einer spinalen Deformation (Mac-Thiong et al. 2011b). Im Kinder- und Jugendalter muss die Position des C7-Lots vor der Hüftkopf-Achse jedoch nicht zwingend eine Pathologie der Wirbelsäule bedeuten, laut Gutman et al. ist dies bei 22 % der asymptomatischen, pädiatrischen Population der Fall (Gutman et al. 2016).

Das Zusammenspiel aus Wirbelsäule, Becken, Hüfte und Beinen inklusiv Muskulatur sorgt mit möglichst geringem Energie-Aufwand für eine möglichst stabile, aufrechte Haltung. Um das sagittale Gleichgewicht bei veränderter Statik der Wirbelsäule, z. B. verstärkter Kyphosierung der thorako-lumbalen Wirbelsäule zu erhalten, verlangt dies Kompensationsmechanismen, die abhängig von PI und der Beweglichkeit der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte sind, um eine Imbalance ausgleichen zu können. Bei fehlenden Kompensationsmechanismen kommt es z. B. durch die Kyphosierung zu einer Verlagerung des Körperschwerpunkts nach ventral, was zu einer Retroversion des Beckens mit einer Abnahme von SS und einer Zunahme von PT führt, damit die Wirbelsäule wieder im Lot ist. Bei ausgereizter Kompensation kommt es zum Oberkörper-Überhang nach ventral, hier spricht man dann von einer dekompenzierten sagittalen Imbalance. Die kompensatorischen Möglichkeiten sind ebenfalls abhängig vom Alter des Patienten (Muskeln, Beweglichkeit der Wirbelsäulensegmente) und der Höhe der Läsion in der Wirbelsäule: Je kaudaler die problematische Stelle der Wirbelsäule ist, desto größer sind die Auswirkungen auf die sagittale Balance, desto schwieriger ist die weitere Kompensation (Ferraris et al. 2012).

Als erster Kompensationsmechanismus wird die Zunahme der Lordose (intervertebrale Segmente oder Einschluss mehrerer Wirbelkörper) bis zum Retrovertieren des Beckens beschrieben. Der zweite Kompensationsmechanismus spiegelt sich in den Spondylolisthese-Typen 5 und 6 nach der SDSG-Klassifikation mit retrovertiertem Becken wider. Hier verändern sich die spino-pelvinen Parameter: SS fällt mit zunehmender Retroversion des Beckens und PT steigt mit zunehmender Senkrechtstellung des Beckens. Ist das Limit der Kompensation erreicht, besteht eine sagittale Rumpf-Imbalance. Hierbei zeigt sich häufig eine kompensatorische Hüft-Beugung oder Ventralneigung des Rumpfes, die als positive sagittale Imbalance beschrieben wird (Labelle et al. 2011).

In der Studie von Hresko zeichnen sich bei Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese (PI hoch bei hochgradiger Spondylolisthese: $78.9^\circ \pm 12.1^\circ$) zwei Gruppen in Bezug auf die Ausrichtung des Beckens ab. Patienten mit einem retrovertierten Becken zeigen ein hohes PT ($36.5^\circ \pm 8.0^\circ$) und ein niedriges SS ($40.3^\circ \pm 9.0^\circ$), die als unbalanciert bezeichnet werden. Hierbei zeigt sich außerdem eine größere Varianz der sagittalen spinalen Balance: kyphotisches lumbosakrales Alignment (LSA + L4-Slope), größerer L5-Slope, größere lumbale Lordose mit größerer Anzahl an Wirbelkörpern in der Lordose und einer weniger kyphotischen BWS. Im Vergleich dazu beschreibt Hresko Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese mit niedrigem PT ($21.3^\circ \pm 8.2^\circ$) und hohem SS ($59.9^\circ \pm 11.2^\circ$) sowie einem Becken in Anteversion, ähnlich bei der gesunden, asymptomatischen Kontroll-Gruppe (PT $10^\circ \pm 7.6^\circ$, SS $40^\circ \pm 8^\circ$, PI $50^\circ \pm 10.7^\circ$), als balanciert (Hresko et al. 2007).

Ebenso zeigt sich bei pelviner Imbalance durchschnittlich ein fortgeschrittenes Abgleiten ($78\% \pm 23.7$), im Vergleich zur balancierten Gruppe der hochgradigen Spondylolisthesen ($68\% \pm 46.9$) (Hresko et al. 2007, S. 2210–2213).

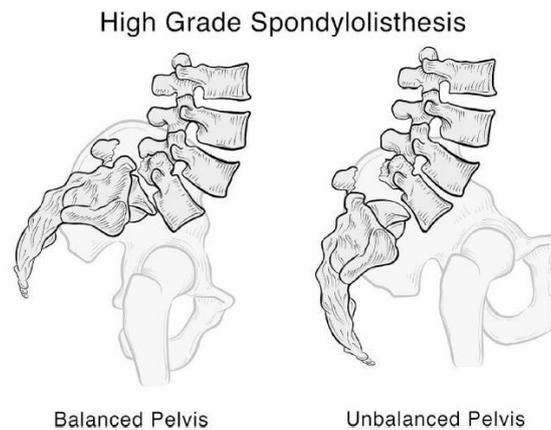


Abb. 17: Darstellung des Beckens bei hochgradiger Spondylolisthese: Links - balanciert bei Becken in Anteversion, rechts - unbalanciert bei Becken in Retroversion. (Hresko et al. 2007, S. 2212).

Eine sogenannte fixierte sagittale Imbalance sieht man vor allem bei Patienten mit langstreckiger, lumbaler Spondylodese. Aufgrund der Versteifung herrscht ein Missverhältnis zwischen LL und PI (Decker et al. 2016, S. 130).

Im Fall einer Spondylolisthese lässt sich in der Literatur ein Zusammenhang zwischen einer erhöhten PI und der Entstehung, Progredienz und Schweregrad einer Spondylolisthese finden. Die erhöhte PI bewirkt eine vergrößerte lumbale Lordose und eine vergrößerte SS, was zu einer Verschiebung des Sakrums nach Horizontal führt (Ferraris et al. 2012).

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Risikofaktoren für einen möglichen Progress einer Spondylolisthese, z. B. weibliches Geschlecht, junges Alter und höherer bzw. steigender Schweregrad der Listhese bei Auftreten und Diagnose sowie ein hoher Dysplasie-Grad (Mac-Thiong und Labelle 2006).

Sevrain et al. analysierte prädiktive Risikofaktoren für den Progress hochgradiger Spondylolisthesen am Modell. Hier zeigt sich v. a. eine Überlastung und Kompression im anterioren Bereich der Wachstumsfuge des Sakrums verursachend. Diese Beanspruchung führt zu einem Anstieg des Gleitgrades, SS und PI (Sevrain et al. 2012).

Roussouly hat 2005 mit seinen Wirbelsäulen-Typen (siehe Abb. 18) verdeutlicht, dass es auch im Normbereich der sagittalen Balance eine Variation an Wirbelsäulenprofilen gibt. So beschreibt er vier Typen, die sich durch das Verhältnis zwischen lumbaler Lordose und thorakaler Kyphose sowie durch die Höhe von PI und SS auszeichnen. Am häufigsten kommt der Typ 3 vor, dieser ist am besten durch ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Lendenlordose und Thorakalkyphose bei einer hohen PI und einer SS zwischen 35 und 45 Grad balanciert (Roussouly et al. 2005; Pingel et al. 2018).

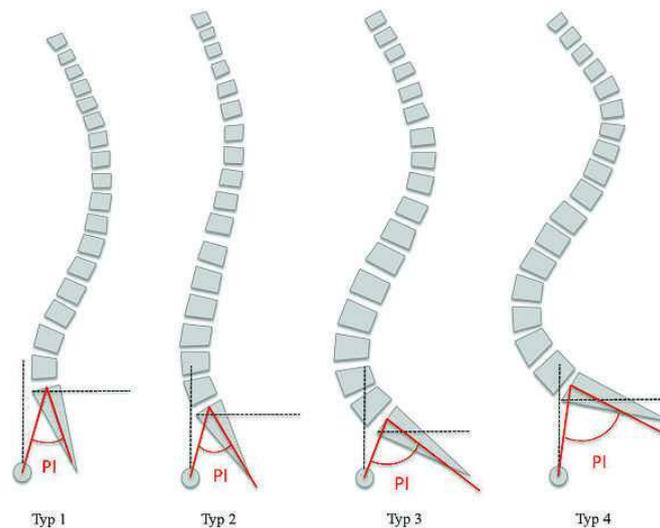


Abb. 18: Wirbelsäulen-Typen nach Roussouly (Scheyerer und Werner 2013)

Die Wiederherstellung der sagittalen Balance ist nach heutigem Stand der Literatur Voraussetzung für gute Langzeitergebnisse einer operativen Therapie bei Wirbelsäulen-Deformitäten (Ferraris et al. 2012).

1.3 Fragestellung und Zielsetzung

Ziel meiner Dissertation ist es, die Effektivität des Verfahrens der kombiniert ventro-dorsalen Therapieoptionen von hochgradigen Spondylolisthesen im Rahmen einer retrospektiven Studie zu untersuchen und zu vergleichen.

Zur Beurteilung der Sicherheit des Verfahrens wird eine Komplikationsanalyse und Stratifizierung von Risikofaktoren durchgeführt.

Es erfolgt eine radiologische Auswertung der Korrektur und des sagittalen Alignments präoperativ, postoperativ und bei der letzten Nachuntersuchung. Diesbezüglich werden multiple, standardisierte, radiologische Parameter eingesetzt (siehe 2.3 Radiologische Parameter und enthaltene Abbildungen). Die Korrelation radiologischer und klinischer Parameter sowie der Einfluss der sagittalen Balance-Parameter auf klinische Ergebnisse wird untersucht.

Im Vergleich mit vorhandener Literatur wird die Effektivität des Verfahrens bewertet und diskutiert. Basierend auf den Studienergebnissen werden prädiktive Faktoren dargestellt.

2 Patienten und Methoden

2.1 Patientenkollektiv

Für die retrospektive Studie wurden die Daten von 119 Patienten begutachtet, die in einem Zeitraum von 13 Jahren in einem deutschen Wirbelsäulenzentrum (WWK Bad Wildungen) aufgrund einer hochgradigen Spondylolisthese oder Spondyloptose operativ behandelt wurden. Diese wurden nach folgenden Kriterien beurteilt.

2.1.1 Einschlusskriterien

- * Hochgradige Spondylolisthese mit Grad III nach Meyerding oder mehr
- * Männliche und weibliche Patienten
- * operative Versorgung
- * Röntgenbilder in anterior-posteriorem und lateralem Strahlengang der kompletten Wirbelsäule zu folgenden Zeitpunkten: präoperativ, postoperativ und zur Nachuntersuchung (FU = Follow-up; frühestens nach 6 Monaten)

2.1.2 Ausschlusskriterien

- * Listhesegrad II nach Meyerding oder weniger
- * fehlende oder unvollständige Röntgenbilder
- * qualitativ unverwertbare Röntgenbilder
- * fehlende Nachuntersuchung (FU)

Basierend auf den o. g. Kriterien konnten aus einer konsekutiven Serie von Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese insgesamt 101 Patienten in die Studie eingeschlossen werden.

Medizinische Aufzeichnungen und Dokumentation des Operateurs lagen zur Analyse des Patientenkollektivs vor. Das Auftreten einer Fußheberparese (FHP) von L5 mit Streckdefizit $\leq 3/5$ Kraftgrade wurde für den Studienzeitraum analysiert. Diese wurden in Krankenakten mit Notizen von Arzt und Physiotherapeut sorgfältig dokumentiert und postoperativ in standardisiertem Monitoring kontrolliert.

2.2 Operationstechniken

Die Patienten wurden mit verschiedenen Methoden operiert.

Einzeitig bedeutet einen intraoperativen Lage-Wechsel, sodass der Patient in Vollnarkose je nach Beginn von Bauchlage in Rückenlage oder umgekehrt umgelagert werden musste. Zweizeitig bedeutet, dass die gesamte Reposition und Spondylodese auf zwei Tage und somit auf zwei Operationen verteilt wurde.

Des Weiteren wurden die Patienten mit zwei unterschiedlichen Techniken operiert:

Gemäß der Definition in der vorliegenden Arbeit, erfolgte bei einem dorso-ventralen Verfahren (DV) zuerst das Release der dorsalen Elemente und des intervertebralen

Raums zwischen L5-S1 von dorsal. Nach Reposition der Spondylolisthese erfolgte die ventrale Abstützung des intervertebralen Raums mit einem Käfig oder mit einem Knochenspan über den dorsalen Zugang oder über einen ventralen separaten Zugang. Bei letzterem Vorgehen sind ein ventraler retroperitonealer Zugang und Lagewechsel des Patienten notwendig. Diese Patienten wurden in der 360°-Gruppe erfasst.

Das ventro-dorso-ventrale Verfahren (VDV) wurde insbesondere bei Patienten mit Spondyloptosen angewendet. Hierbei kommt es zu zwei intraoperativen Umlagerungen, von Rücken- zu Bauch- und abschließend nochmals zu Rückenlage, d. h. ein 540°-Lagerungswechsel und Zugang. Der vordere Zugang wurde zum offenen Release (Lockerung) des L5-S1-Bandscheibenfachs durchgeführt, um die posteriore Reposition des Listhesegrades zu erleichtern. Diese Patienten wurden in der 540°-Gruppe erfasst.

Alle Patienten erhielten ein posteriores Release mit Laminektomie von L5, eine partielle obere Laminotomie von S1, eine komplette Facettengelenksresektion von L5-S1 sowie eine komplette Foramen-Dekompression von L5-S1 unter Kontrolle der L5-Nervenwurzel vom Eingang des L5-Niveaus bis zum Ausgang des L5-S1-Foramens. Die Instrumentation wurde mit langköpfigen Reduktionspedikelschrauben in L5 und optional in L4 durchgeführt. Die Bandscheibe von L5-S1 wurde komplett mit Meißel, Küretten und Faszange entfernt. Die dom-förmige S1-Deckplatte bei Patienten mit dysplastischer HGS wurde mit einem Meißel abgeflacht. Die Reposition des Listhesegrades erfordert eine Distraction und posteriore Translation. Um die Reposition und das Einbringen der Schrauben zu erleichtern, wurde vorübergehend ein angepasster Harrington-Stab an der S1-Lamina auf den Processus spinosus von L3 angebracht. Nach Einbringen der Pedikelschrauben wurde die Reposition über S1- oder mit S1+S2 Schraubenkonstruktionen eingeleitet und in einem seitenweise sich wiederholendem Vorgang die Reposition durchgeführt. Die Erweiterung der S2-Instrumentierung wurde nur bei Patienten durchgeführt, bei denen eine große Reposition und damit einhergehend erhöhte Rückstellkräfte zu erwarten waren, sowie bei älteren Patienten oder Patienten mit schlechter Knochenqualität. Eine posterolaterale Fusion wurde bei allen Patienten durchgeführt. Eine Ausdehnung der Fusion auf L4 oder höher wurde ebenfalls nur bei Patienten mit erhöhten Repositionskräften durchgeführt sowie bei angrenzender Segment-Degeneration, bei Patienten mit kleiner, aber strukturell geringerer lumbaler olisthetischer Kurve sowie bei Patienten mit L5-Korporektomie. Eine vorübergehende Instrumentierung von L4-5 erfolgte nur bei fünf Kindern mit anschließender Metallentfernung im Segment L4-5 nach erreichter Fusion im Segment L5-S1. Nach der dorsalen Korrektur wurde die ventrale Fusion von L5-S1 mit Einbringung eines Titan-Cages vollendet, der mit einem autologem Knochen aus dem Beckenkamm gefüllt wurde.

Weiterführende Erläuterungen bzgl. der OP-Verfahren siehe Kapitel 1.1.4.2 .

2.3 Radiologische Parameter

Für die Vermessung der Spondylolisthese und Spondyloptose sowie der Beurteilung im Rahmen der Studie wurden Röntgen-Aufnahmen der vollständig projizierten Wirbelsäule in anterior-posteriorem (a. p.) und lateralem Strahlengang in stehender Aufnahme-Position der Patienten verwendet. Diese Aufnahmen wurden jeweils vor als auch nach dem operativen Eingriff an der Wirbelsäule gemacht. Des Weiteren wurden Kontroll-Aufnahmen ebenfalls in a. p. und lateraler Position bei der Nachuntersuchung, jedoch frühestens sechs Monate nach der Operation angefertigt. Die Messungen erfolgten digital im PACS-System oder auf analogen Röntgenaufnahmen.

2.3.1 Lateraler Strahlengang der LWS

Zur Vermessung der lumbo-sakralen Parameter wurde eine Röntgenaufnahme im Stehen der Lendenwirbelsäule mit Projektion der Hüftköpfe verwendet. In Abb. 19 (folgende Seite) ist eine beispielhafte Messung skizziert. Die Parameter der Messung werden im Folgenden erläutert. Weitere Erläuterungen und Normwerte wurden bereits in der Einleitung, Kap. 1.2.1, ab S.17 dargestellt. Es konnten bei 72 Patienten valide Daten für die folgenden drei Parameter ermittelt werden.

2.3.1.1 Sakrumkipfung/Beckenneigung, ‚Sacral Slope‘ (SS)

Für die Bestimmung des Neigungswinkels des Sakrums im Becken wird am dorsalen Ende des Sakrums in der lateralen Aufnahme der LWS (Abb. 19) eine horizontale Hilfslinie angebracht und daraus der Winkel zwischen Sakrum-Deckplatte und horizontaler Hilfslinie bestimmt. Somit steigt der Wert bei zunehmender Beckenanteversion und sinkt bei Retroversion.

2.3.1.2 Pelviner Inzidenzwinkel, ‚Pelvic Incidence‘ (PI)

Ausgehend vom Mittelpunkt der Kreuzbein-Deckplatte wird ein Lot zu der Ebene des Sakrums gezogen und ein Winkel zur Mitte der Verbindungslinie zwischen den Hüftkopf-Zentren gebildet (Abb. 19). Dieser Wert ist individuell, bei abgeschlossenem Wachstum konstant und verändert sich nicht durch Mobilisation der Wirbelsäule oder des Beckens. PI bestimmt die Stellung des Sakrums im Becken in Bezug auf die Wirbelsäule, damit beeinflusst PI die lumbale Lordose.

2.3.1.3 Beckenrotation, ‚Pelvic Tilt‘ (PT)

Von der Mitte der Hüftkopf-Verbindungsline ausgehend wird zwischen einer vertikalen Hilfslinie und der Linie zur Mitte der Sakrum-Deckplatte die Neigung des Beckens gemessen (Abb. 19). Mit diesem Parameter kann man die Balance des Beckens in Bezug auf die Wirbelsäule einschätzen, da dieser zusammen mit SS zu den dynamischen, pelvinen Parametern gehören. Dieser Wert ist positiv, wenn die Hüftachse ventral der Sakrum-Deckplattenmitte verläuft. Zudem steigt PT bei Beckenretroversion und sinkt bei Beckenanteversion entsprechend des umgekehrten Abfalls und Anstiegs von SS bei Mobilisation.

Die Röntgenbilder wurden nach folgenden Parametern vermessen:

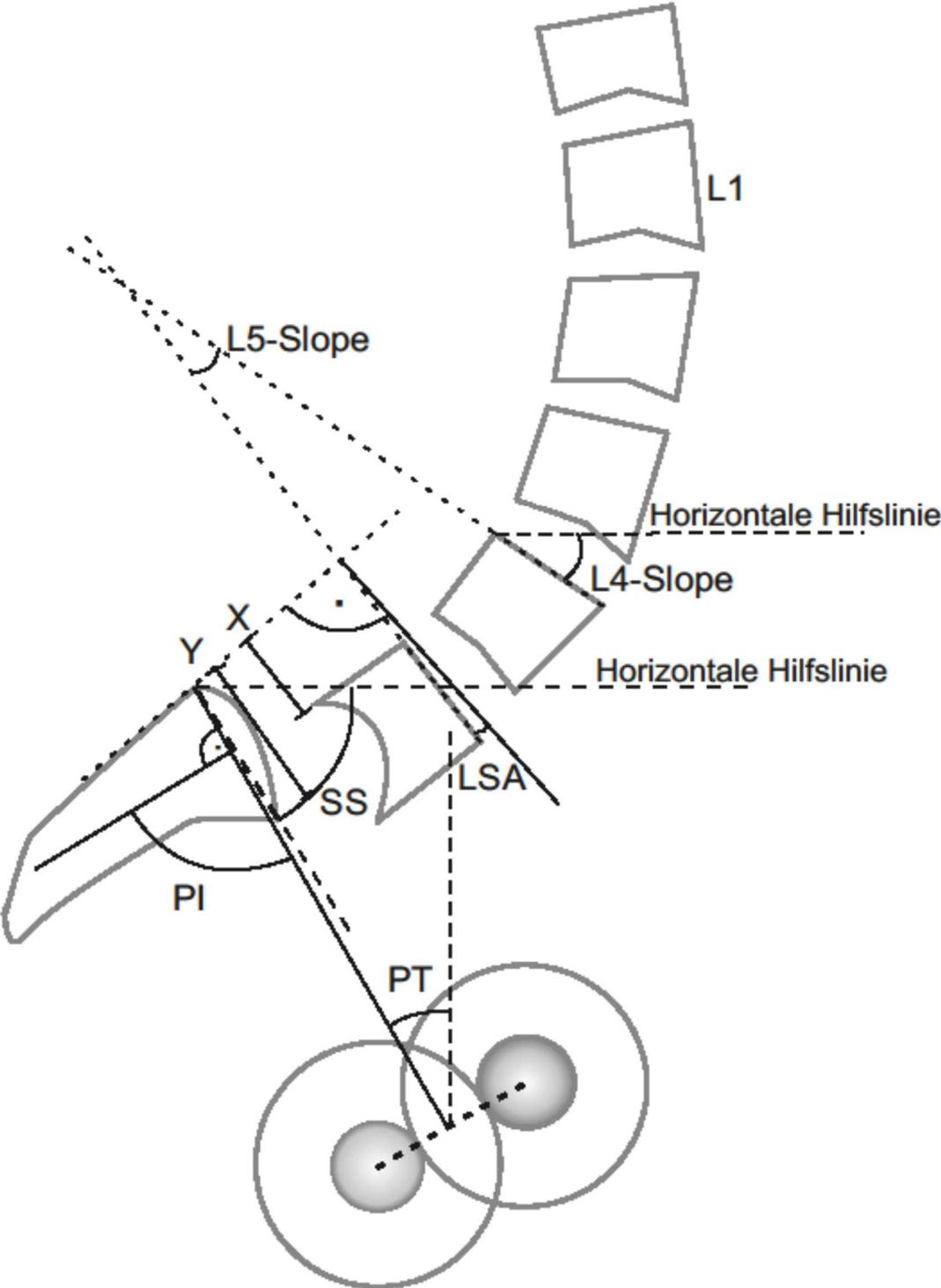


Abb. 19: Skizze Messung LWS in lateralem Strahlengang, Abkürzungen siehe Kap. 2.3.1, eigenes Bildmaterial

2.3.1.4 Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation

Zur Bestimmung des Listhesegrades nach Meyerding (MD) wird in Verlängerung der dorsalen Kante des Sakrums eine Linie nach kranial gezogen. Hierzu nimmt man die Länge der Deckplatte des Sakrum als ‚Y‘, in [mm] gemessen. Der Abstand zwischen der Verlängerungslinie der dorsalen Sakrumkante und dem kaudalen dorsalen Ende des fünften Lendenwirbelkörpers (L 5) wird als ‚X‘, gemessen in [mm], bezeichnet. Für den Listhesegrad bzw. L5-Translation wird X durch Y dividiert. Das Ergebnis wird in Prozent angegeben. Mehr als 100 % ist als Grad 5 nach Meyerding klassifiziert und wird als Spondyloptose bezeichnet. Mehr als 75 % ist Grad 4 nach Meyerding, mehr als 50 % ist Grad 3 nach Meyerding, mehr als 25 % ist Grad 2 nach Meyerding und weniger als 25 % ist Grad 1 nach Meyerding. Die Einteilung der Spondylolisthese nach Meyerding ist in Abb. 20 zu sehen.

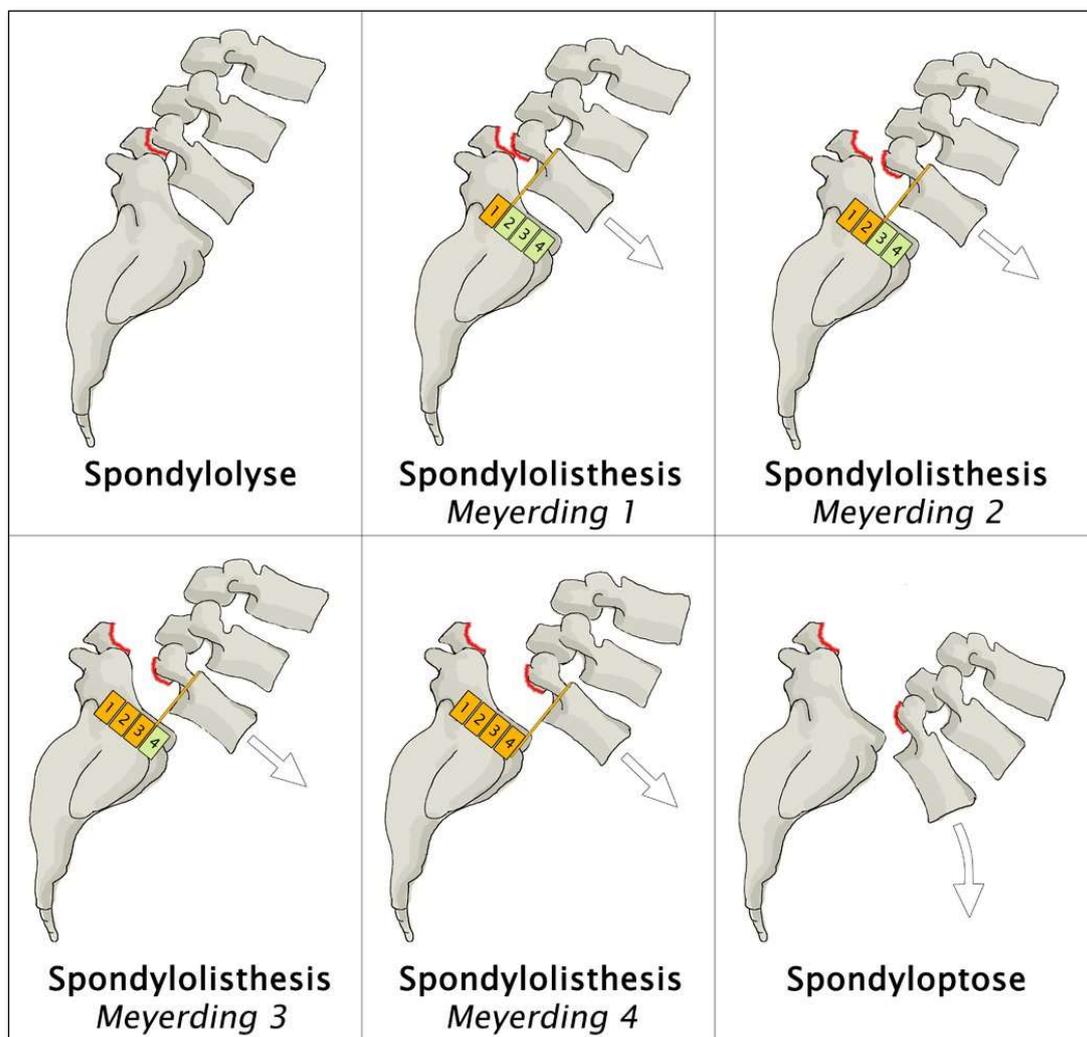


Abb. 20: Skizze Klassifikation Listhesegrad nach Meyerding (AMBOSS GmbH 2020).

2.3.1.5 L5-Slope

Die Neigung von L5 wird mit Hilfe eines Winkels zwischen der Deckplatte von L5 und der Deckplatte von L4 gemessen (siehe Abb. 19).

2.3.1.6 L4-Slope

Die Neigung von L4 wird mit Hilfe eines Winkels zwischen der Deckplatte von L4 und einer horizontalen Hilfslinie gemessen (siehe Abb. 19).

2.3.1.7 ‚Lumbal-sacral-angle‘ (LSA)

Es wird ein Lot der Verlängerungslinie der dorsalen Sakrumkante gefällt und anschließend der Winkel zwischen dem Lot und der Deckplatte von L5 gemessen. Dieser Parameter beschreibt das Verhältnis zwischen dem Lendenwirbelbereich und dem Sakrum (siehe Abb. 19). Diese Messung entspricht der Technik von Dubousset (Dubousset 1997). LSA und L4-Slope werden zusammen als lumbosakrale Kyphose bezeichnet. In unserer Studie ähnelt der aufgezeichnete Winkel LSA einer Subtraktion von 90° zur Betonung der postoperativen Veränderung von einer präoperativ kyphotischen Position zum Sakrum (gekennzeichnet mit ‚+‘ Werten) zu einer postoperativ lordotischen Position (gekennzeichnet mit ‚-‘ Werten).

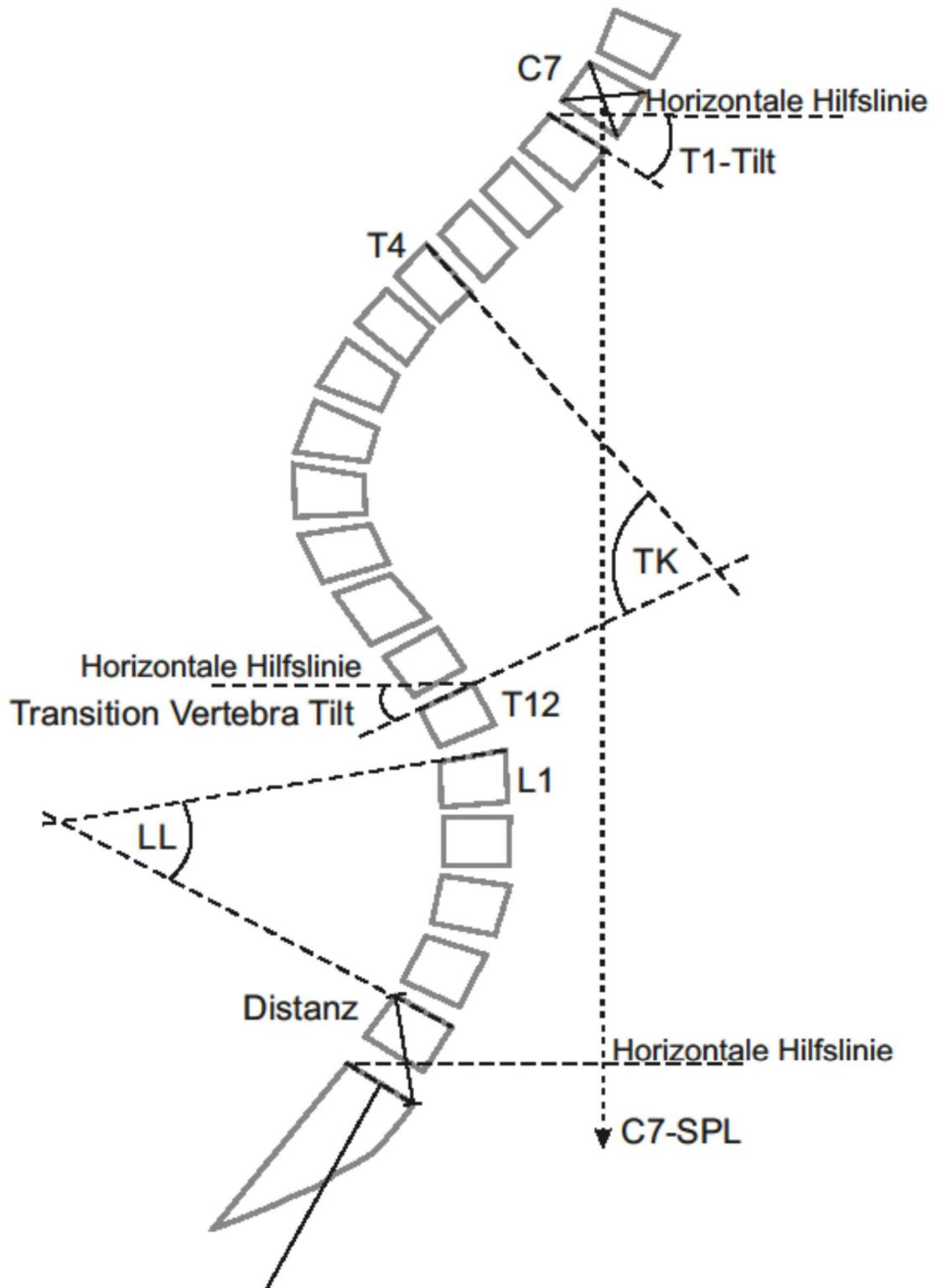


Abb. 21: Skizze Messung Wirbelsäule im lateralen Strahlengang, Abkürzungen siehe Kap. 2.3.2 eigenes Bildmaterial

2.3.2 Lateraler Strahlengang der kompletten Wirbelsäule

2.3.2.1 Vertikale Distanz L5-S1

Der Abstand zwischen der ventralen Sakrum-Deckplatten-Kante und der dorso-kranialen Kante von L5 (in mm) bemessen in sagittaler Ebene wird als vertikale Distanz bezeichnet. Dieser Abstand vergrößert sich, wenn z. B. der Wirbelkörper L5 bei höhergradiger Listhese nach ventral abkippt (siehe Abb. 21).

2.3.2.2 Lumbale Lordose (LL)

Zur Messung der lumbalen Lordose wird ein Winkel zwischen den Deckplatten von L1 und L5 gebildet (siehe Abb. 21). LL ist abhängig von PI als konstanter morphologischer Beckenparameter.

2.3.2.3 Thorakale Kyphose (TK)

Die thorakale Kyphose wird zwischen den Deckplatten von T4 und T12 gemessen (siehe Abb. 21).

2.3.2.4 Transition Vertebra Tilt, Neigung des Übergangswirbelkörpers

Die Neigung des Wirbelkörpers, der den Übergang zwischen der Kyphose im BWS-Bereich und der Lordose im LWS-Bereich darstellt, wird zwischen der Deckplatte und einer horizontalen Hilfslinie gemessen und ist individuell (siehe Abb. 21).

2.3.2.5 Sagittal vertical Axis, sagittal-vertikale Achse (SVA, C7-SPL, C7-Lot)

Ausgehend vom 7. Halswirbelkörper (C7, Vertebra prominens) wird eine vertikale Hilfslinie (C7-Plumb line) nach kaudal gezogen. Diese kreuzt im LWS-Bereich eine horizontale Hilfslinie, ausgehend von der Sakrum-Deckplatte. Der Abstand von der Sakrum-Hinterkante bis zum Schnittpunkt der zwei Hilfslinien wird als SVA oder C7-SPL (C7-Lot), gemessen in [mm], bezeichnet und ist ein Parameter zur Beschreibung der spino-pelvinen Balance. (siehe Abb. 21) Diese orientiert sich ebenfalls an der Position der vertikalen Hilfslinie zur Position der Hüftköpfe. Normwert ist unter 50 mm bei balancierter Wirbelsäule (Pingel et al. 2018). In ergonomisch günstiger Position der Wirbelsäule und des Beckens verläuft die Linie hinter dem Wirbelkörper L3 und hinter den Hüftköpfen.

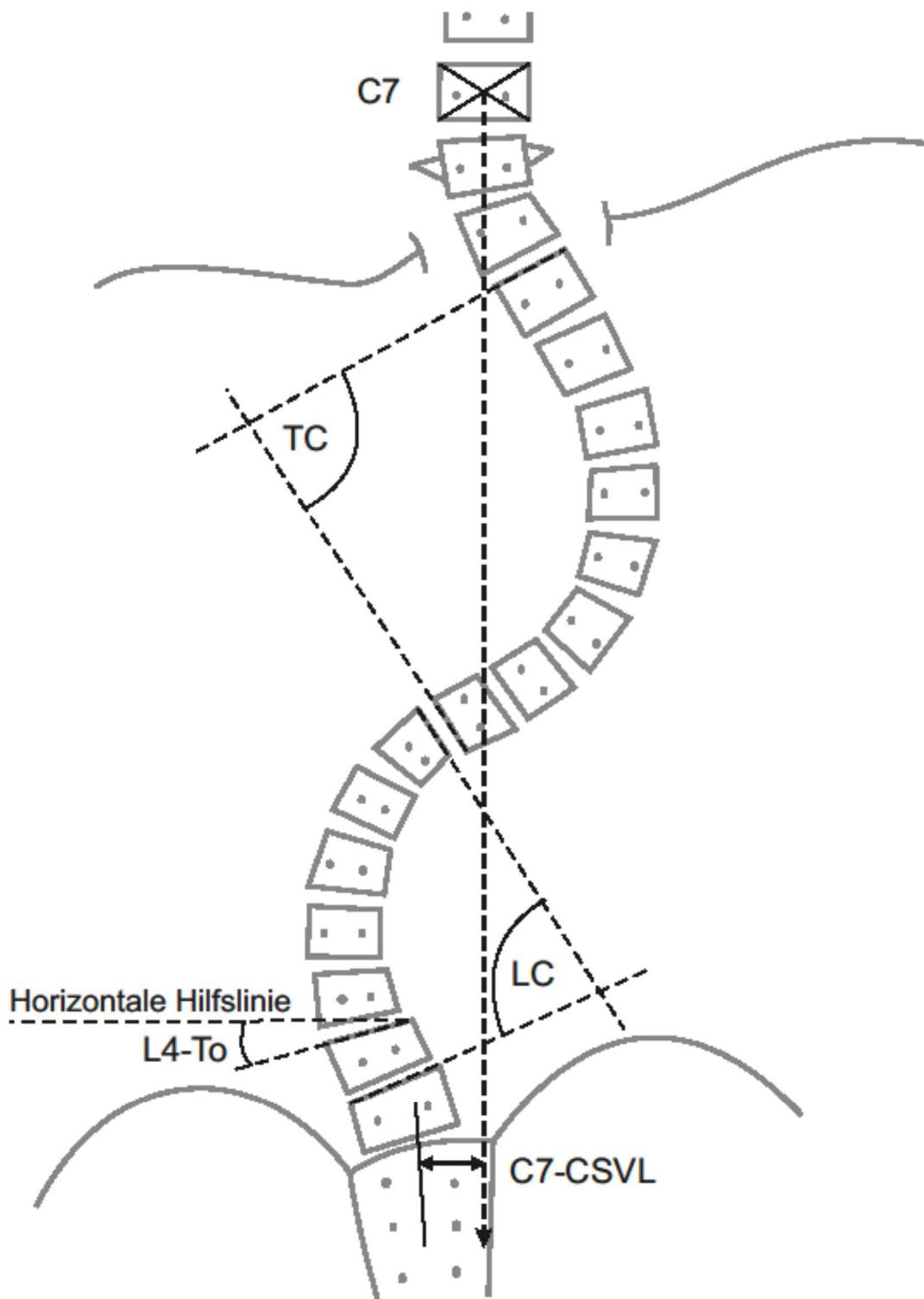


Abb. 22: Skizze Messung Wirbelsäule in anterior-posteriorem Strahlengang, Abkürzungen siehe Methodenteil Kap. 2.3.3, eigenes Bildmaterial

2.3.3 Wirbelsäule in anterior-posteriorem Strahlengang

In der Röntgenaufnahme aus anterior-posteriorer Sicht wird die Wirbelsäule auf eine skoliotische Achs-Abweichung geprüft. (siehe Abb. 22)

2.3.3.1 Thorakale Kurve (TC)

Hierzu wird mit Hilfe des Cobb-Verfahrens (Niethard et al. 2009, S. 391ff.), einem radiologischen Messverfahren bei skoliotisch veränderten Wirbelsäulen, die Seitverbiegung bestimmt. Es wird ein Winkel zwischen der Grund- bzw. Deckplatte des obersten und untersten zur Kurve gehörenden Wirbelkörpern, den Neutralwirbeln, gemessen. Der Neutralwirbel ist definiert als der Wirbel, in dem die Konvexität in Konkavität umschlägt, d. h. es besteht ein Richtungswechsel der Wirbelsäule. (s. Abb. 22)

2.3.3.2 Lumbale Kurve (LC)

Äquivalent zur thorakalen Kurve wird im Falle einer Achs-Abweichung im lumbalen Bereich eine sogenannte ‚lumbar curve‘ (**LC**, lumbale Kurve) gebildet, Vorgehen ebenfalls nach der Cobb-Methode. (s. Abb. 22)

2.3.3.3 L4-Take-off, Kippung des 4. Lendenwirbelkörpers

Man misst die Neigung des Lendenwirbelkörpers L4 (**L4-Take off**) mit einem Winkel zwischen der Deckplatte von L4 und einer daran angelegten horizontalen Hilfslinie. Bei Neigung der Deckplatte, und somit der Öffnung des Winkels nach links, wird der Winkel negativ. (s. Abb. 22)

2.3.3.4 C7-CSVL, C7-Centre Sacral vertical Line

Des Weiteren wird eine vertikale Hilfslinie vom Zentrum des Wirbelkörpers C7 nach kaudal angelegt. Diese soll den Abstand zur CSVL (central sacral vertical line, vertikale Linie zum Zentrum des Kreuzbeins) verdeutlichen, die durch die eventuell skoliotische Achsabweichung entstanden ist. Dieser Parameter wird als **C7-CSVL** bezeichnet. Wenn die Gerade von C7 im Vergleich zu CSVL nach links verschoben ist, wird das Ergebnis negativ. (s. Abb. 22)

Alle Aufnahmen wurden von mir persönlich ausgemessen und von Prof. Dr. H. Koller auf Konstanz über Stichproben geprüft. Die Stichprobenabweichung beträgt maximal 2°. Es kann davon ausgegangen werden, dass eventuell vorhandene, systematische Messfehler eine Konstanz aufweisen und sich beim Vergleich der Parameter untereinander, d. h. bei der Bildung der Differenzen, nahezu aufheben. Für die Verteilung der zufälligen Messfehler wird eine Normalverteilung angenommen (Aota et al. 2015).

2.4 Fragebogen zur gesundheitsbezogenen Lebensqualität (HrQoL)

Ein klinischer, standardisierter Fragebogen ermittelte den zum Zeitpunkt der Befragung aktuellen Gesundheitszustand und das Wohlbefinden der Patienten (Health-related Quality of Life, HrQoL). Von 101 in die Studie eingeschlossenen Patienten lagen 46 vollständig ausgefüllte Fragebögen im Rahmen der Patientenbehandlung vor (46,5 %).

Der gesamte Fragebogen ist im Anhang zu sehen (siehe Kap. 8.1) und besteht aus folgenden Bausteinen.

2.4.1 Standardisierter Fragebogen

Der Fragebogen besteht aus acht Fragen und enthält Anteile (4 Fragen) des COMI-Patienten-Fragebogens, der zur Selbsteinschätzung des Patienten bzgl. Beschwerden und Schmerzen sowie zur Ermittlung des Operationszeitpunkts und weiterer Wirbelsäulen-Operationen dient (Euro Spine 2008). Der Fragebogen wurde mit vier Fragen ergänzt, die sich auf das aktuelle Alter, das Geschlecht, den aktuellen Beruf bzw. die Berentung und den Raucherstatus des Patienten beziehen.

Der COMI-Fragebogen recherchiert in Frage 1, in welchem Jahr die letzte Wirbelsäulen-OP stattgefunden hat. Frage 6 ermittelt die Lokalisation der aktuellen Beschwerden. Mögliche Antworten sind Schmerzen im Rücken, Schmerzen in Bein und Gesäß, Kribbeln / Taubheit / Missempfindungen in Rücken / Bein / Gesäß oder keine der aufgeführten Beschwerden. In Frage 7 wird mit Hilfe einer Schmerzskala (numerische Rating-Skala NRS) von 1 bis 10 (1 = wenig, 10 = viel) die Haupt-Schmerzlokalisierung in Rücken oder Bein und Gesäß anhand der Schmerzintensität unterschieden. Der Patient wird zuletzt in Frage 8 nach möglichen weiteren Operationen / Revisionsoperationen an der Wirbelsäule in einem anderen Krankenhaus befragt (Euro Spine 2008; Mannion et al. 2009b; Mannion et al. 2009a; Mannion et al. 2015; Mannion et al. 2016).

2.4.2 ODI-Fragebogen

Der Oswestry Disability Index (ODI) ist ein Standardfragebogen mit zehn Fragen zur Beurteilung des Ausmaßes der Rückenprobleme im Alltag und etwaige körperliche Einschränkungen durch Schmerzen, ausgehend vom Rücken. Insbesondere dient der ODI als ein Messinstrument zur Beurteilung des klinischen Ergebnisses bei Erkrankungen der Wirbelsäule bzw. nach medizinischen Interventionen an der Wirbelsäule (Fairbank und Pynsent 2000, S. 2940). Es wurde die ODI-Version 2.0 verwendet. Der Patient wird zum aktuellen Zustand gefragt (Fairbank und Pynsent 2000, S. 2946; Mannion et al. 2006a; Mannion et al. 2006b). Die erste Frage bezieht sich auf die Stärke / Intensität der Rückenschmerzen. In den weiteren neun Fragen werden mögliche auftretende oder behindernde Schmerzen bei folgenden

Tätigkeiten ermittelt: Körperpflege, Heben, Gehen, Sitzen, Stehen, Schlafen, Sexualleben, Sozialleben und Reisen. Es gibt je sechs Antwortmöglichkeiten, wobei nur eine gewählt werden darf. Diese sind mit 0 bis 5 Punkten bewertet, wobei die Punktzahl pro Antwort mit zunehmenden Schmerzen und funktionellen Einschränkungen ansteigt. Maximale Punktzahl ist 50, minimal 0 Punkte. Die Punktzahl der zehn Fragen wird addiert, mit zwei multipliziert und anschließend durch 100 dividiert, sodass das Ergebnis prozentual vergleichbar ist (Fairbank und Pynsent 2000; Fawkes 2012). Ein niedriger Wert korreliert folglich mit einer besseren Patientenzufriedenheit und geringeren Schmerzen bei alltäglichen körperlichen Bewegungen.

2.4.3 SF-36-Fragebogen

Der SF-36-Fragebogen ermittelt die Lebensqualität und erfragt gezielt mit elf Fragen den Gesundheitszustand und eventuelle körperliche, psychische und soziale Beeinträchtigungen des Patienten im Allgemeinen und zu verschiedenen Zeitpunkten, sowie in verschiedenen Situationen des Alltags und Soziallebens. Außerdem wird die Schmerzstärke (Frage 7) in den vergangenen vier Wochen ermittelt (Ware und Sherbourne 1992). Ausgewertet wird der SF-36 mit einem Score von 0-100 pro Item, wobei ein hoher Score (max. 100) gleichbedeutend für eine hohe Lebensqualität, ein niedriger Score (min. 0) für eine niedrige Lebensqualität steht (Morfeld et al. 2005; Morfeld et al. 2012; Rand Health Care). Die Fragen wurden nach körperlichen und psychischen Kriterien in zwei Kategorien unterteilt: SF-36 PCS (Physical Component Summary) steht für die körperliche, SF-36 MCS (Mental Component Summary) für die mentale Funktionsfähigkeit (McHorney et al. 1993; Fawkes 2013).

Daraus wurde jeweils der Mittelwert berechnet, der mit verschiedenen Parametern (radiologisch, klinisch) der Studie in einer Korrelationsanalyse auf den Einfluss auf die körperliche und psychische Gesundheit des Patienten untersucht wurde.

2.5 Gruppencharakterisierung

Aus den Patientenakten wurde das OP-Verfahren (einzeitig oder mehrzeitig) sowie eine eventuelle Revisions-OP ermittelt, als auch mögliche Komplikationen um den Zeitpunkt der OP (perioperativ) oder postoperativ, z. B. Fußheberparese einseitig oder beidseitig, Pseudoarthrosen, Infektionen sowie Minor- und Major-Komplikationen nach Glassman (Glassman et al. 2007, S. 2765, Tab.1).

2.6 Statistik

Die klinischen und radiologischen Ergebnisse sowie die Auswertung der Fragebögen wurden auf Korrelation geprüft. Ein Ergebnis mit p-Wert ≤ 0.05 wurde als statistisch signifikant angesehen, eine klinisch relevante Korrelation wurde ab einem Korrelationsgrad von $r \geq \pm 0.4$ definiert. Die Daten wurden auf Konsistenz und Normalität geprüft. Fisher's Exakt-Test oder Pearson's Test wurden verwendet, um eine Kreuztabellierung zu analysieren. Unabhängige t-Tests und Bootstrap-t-Tests wurden mit und ohne Annahme der Varianz-Homogenität errechnet. Korrelationsanalysen wurden durchgeführt. Alle berichteten Tests waren zweiseitig. Alle statistischen Analysen in dieser Studie wurden durch die Benutzung von NCSS (NCSS 10, LLC; Kaysville/UT), STATISTICA 13 (StatSoft, Tulsa, OK) und PASW 24 (IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0, Armonk/NY) ausgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Aus 119 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis während des Untersuchungszeitraumes konnten 101 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Die Geschlechterverteilung stellt sich mit 83 weiblichen Patienten (83.8 %) und 18 männlichen Patienten (18.1 %) dar (siehe Abb. 23).

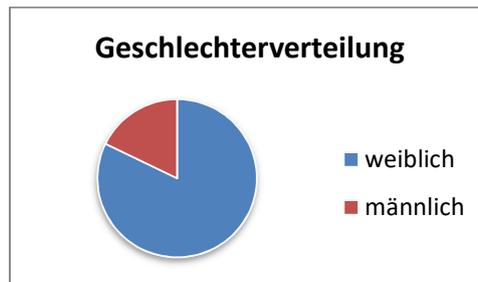


Abb. 23: Geschlechterverteilung der in der Studie inkludierten Patienten

Hier ist ergänzend zu sagen, dass bei 101 eingeschlossenen Patienten die Prozentangabe der absoluten Angabe entspricht, da z. B. fünf Patienten gerundet 5 % entspricht, sodass bei Analysen des Gesamtkollektivs keine ergänzende Prozentzahl angegeben wird.

Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der ersten OP lag bei 26.4 ± 12.7 Jahren (9 bis 59 Jahre; Median: 24 Jahre). 66 Patienten waren jünger als 30 Jahre, 59 Patienten jünger als 20 Jahre. Die Altersverteilung in Gruppen ist graphisch in Abb. 24 zu sehen:

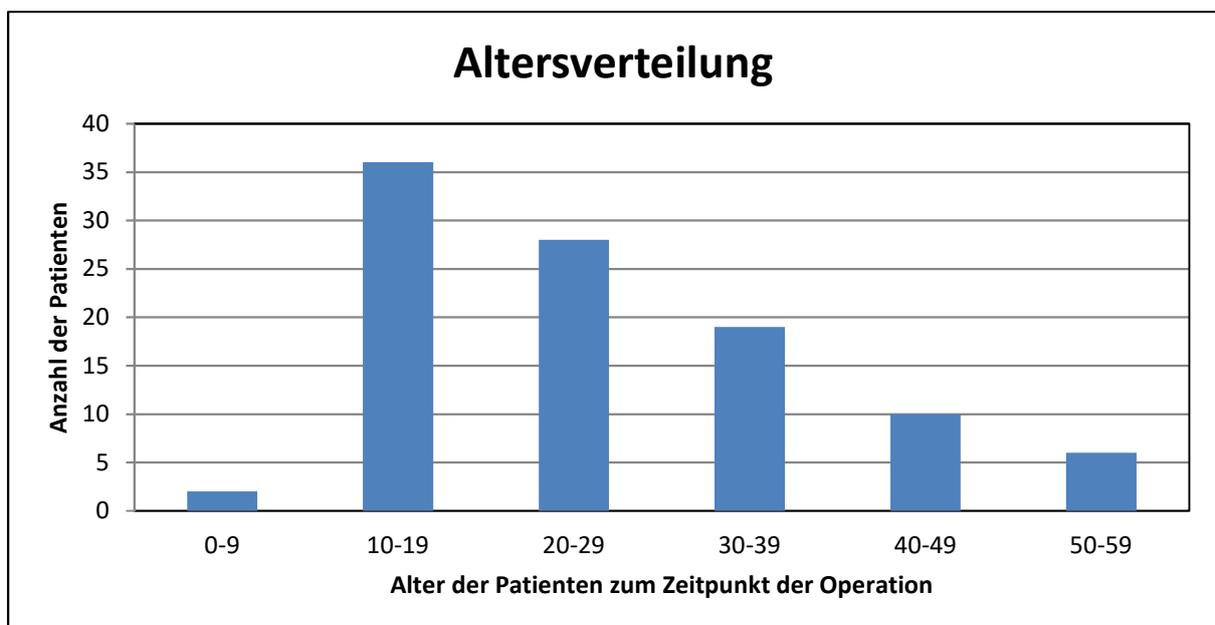


Abb. 24: Altersverteilung der 101 in der Studie inkludierten Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis

Zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung, mind. sechs Monate postoperativ, lag das durchschnittliche Alter bei 30.4 ± 12.9 Jahren (10 bis 70 Jahre; Median: 28 Jahre).

Für alle Patienten lagen klinische und radiologische Daten und Messungen für mehr als ein Jahr Follow-up vor (durchschnittlich 47 Monate, 1-Jahr-Gruppe). Für 46 Patienten lag zudem eine Erhebung zur gesundheitsbezogenen Lebensqualität (Health-related Quality of Life, HrQoL) mit mehr als zwei Jahren Follow-up vor (durchschnittlich 105 Monate, 2-Jahres-Gruppe). Die Analyse des Patientenkollektivs zu Behandlungsbeginn sowie in Bezug auf klinisch-chirurgische und radiologische Ergebnisse zeigt keinen Unterschied bei beiden Gruppen (1-Jahr und 2-Jahres-Gruppe, $p < .05$).

3.2 Radiologische Ergebnisse

Die Auswertung der radiologischen Messungen ist in Tab. 3 zusammengefasst. Die radiologischen Variablen sind in Abb. 19 bis Abb. 22 erklärt (siehe Patienten und Methoden, Radiologische Parameter, 2.3, ab Seite 27). Die radiologischen Ergebnisse wurden jeweils durch Bestimmung mehrerer sagittaler und spino-pelviner Parameter auf Röntgenaufnahmen vor der OP (präop), nach der OP (postop) und zum Follow-up (FU) ermittelt.

3.2.1 Listhesegrad

Der Listhesegrad der Patienten zum Einschluss in die Studie musste ≥ 3 nach Meyerding sein. Bei insgesamt 101 eingeschlossenen Patienten hatten 48 Patienten radiologisch eine Listhese Grad 3 nach Meyerding, bei 25 Patienten wurde eine Listhese Grad 4 diagnostiziert und bei 28 Patienten lag eine Spondyloptose (Listhese Grad 5) vor. Graphisch dargestellt ist die Verteilung nach Listhesegrad in folgender Abbildung:

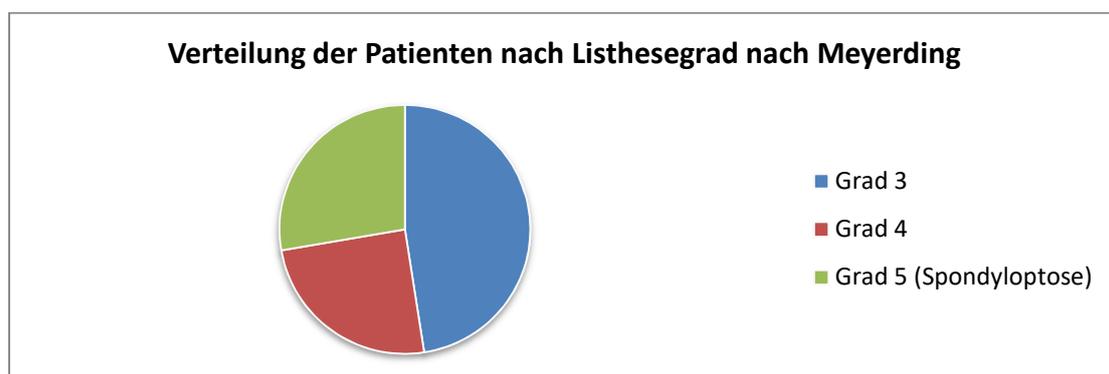


Abb. 25: Verteilung von 101 Patienten nach Listhesegrad nach Meyerding

Durchschnittlich betrug der Listhesegrad nach Meyerding präoperativ 3.8 ± 0.8 (L5-Translation $80.9 \% \pm 22.4$). Postoperativ zeigten sich die Messergebnisse deutlich reduziert bei 1.1 ± 0.1 ($17.8 \% \pm 12.5$), zur FU erneut minimal progredient 1.4 ± 0.1 ($22.9 \% \pm 11.9$). Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied des Listhesegrades und

der L5-Translation (%) zwischen den Messungen der drei Zeitpunkte: Präop vs. postop (2.7 ± 0.1 , $p < .01$; $65\% \pm 20.8$, $p < .01$). Der Vergleich zu Präop vs. FU bzw. Postop und FU ist ebenfalls signifikant.

Die Messungen sind nachfolgend graphisch in Abb. 26 sowie in Tab. 3 dargestellt.

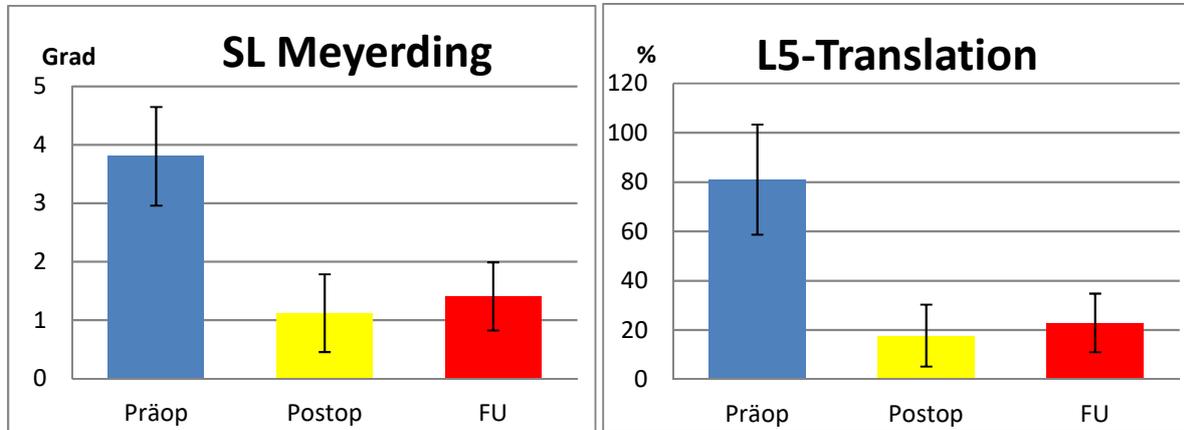


Abb. 26: Messungen von Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation (%) zum Zeitpunkt präop, postop und FU (Mittelwert \pm 1 Standardabweichung als Vertical-Bar)

Eine vollständige Reposition der Listhese, entsprechend der Definition nach Meyerding <1 bzw. eine L5-Translation $<20\%$, konnte bei 55 bzw. 42 Patienten erreicht werden. Diese vollständige Reposition zeigte sich signifikant häufiger bei präoperativ niedrigerem Listhesegrad (3.6 ± 0.8 vs. 4.0 ± 0.9 , $p < .01$; L5-Translation: $75.3\% \pm 18.9$ vs. $87.8\% \pm 24.7$; $p < .01$). Der Listhesegrad zeigt sich zum Follow-Up bei kompletter Reposition ebenfalls signifikant niedriger als bei inkompletter Reposition ($<20\%$) (0.9 ± 0.3 vs. 1.8 ± 0.4 ; $p < .01$; L5-Translation: $11.4\% \pm 5.6$ vs. $31.1\% \pm 7.8$; $p < .01$). Ebenso ist die Anzahl der instrumentierten Wirbelkörper bei vollständiger Reposition signifikant geringer, im Vergleich zur unvollständigen Reposition des Listhesegrades (1.4 ± 0.6 vs. 1.7 ± 0.8 ; $p < .02$).

Bei Erreichen einer vollständigen Reposition zeigt sich auch eine signifikant höhere lumbale Lordose zum FU ($54.6^\circ \pm 14.4^\circ$ vs. $48.6^\circ \pm 13.2^\circ$; $p = .03$), während präoperativ kein Unterschied zu sehen war (63° vs. 61° , ns). Eine postoperativ inkomplette Reposition ($<20\%$) des Listhesegrades lag häufiger im Fall von eingetretenen Revisionseingriffen vor (74.2% vs. 51.4% ; $p = .03$). Die Anzahl der Revisionsoperationen zeigte sich bei kompletter Reposition des Listhesegrades signifikant geringer (0.7 ± 0.6 vs. 1.4 ± 0.7 ; $p < .01$). Nach L5-KE konnte eine komplette Reposition signifikant seltener erreicht werden als im Vergleich zur partiellen Reposition ($<20\%$) (29.4% vs. 82.4% ; $p = .02$).

Es zeigt sich eine mittelstarke Korrelation von Meyerding-Grad präoperativ zur Anzahl notwendiger Revisions-OPs ($r = .48$, $p = .006$) und der Anzahl der instrumentierten Wirbelkörpersegmente ($r = .37$, $p = .000$). Des Weiteren korreliert die Schwere des Listhesegrades mit dem VAS-Bein ($r = -.36$, $p = .014$), SS präop ($r = -.42$, $p = .000$) sowie LSA präop ($r = .61$, $p = .000$).

Bei 11 Patienten/-innen lag gleichzeitig zur HGS eine lumbale Skoliose $>20^\circ$ nach Cobb vor.

3.2.2 Sagittales pelvines Profil

Für die pelvinen Parameter PI und SS konnten valide Daten für insgesamt 72 bzw. 101 Patienten erhoben werden. Der PT wurde aufgrund radiologischer Bildeinschränkungen auf den unmittelbar postoperativen radiologischen Aufnahmen nicht häufig genug valide erfasst und wurde daher in der stat. Analyse exkludiert.

In der folgenden Tabelle sind detaillierte klinische und radiologische Ergebnisse von 101 analysierten Patienten mit HGS einsehbar.

Radiologische Parameter	Präop	Postop	Follow-Up	Δ Präop:Postop	Δ Postop:Follow-up
	Mean \pm 1SD	Mean \pm 1SD	Mean \pm 1SD	P-Level	P-Level
Listhesegrad nach Meyerding	3.8 \pm 0.8	1.1 \pm 0.7	1.4 \pm 0.6	p<.01	p<.01
L5 -Translation (%)	81 \pm 22.5%	17.8 \pm 12.6%	22.9 \pm 12%	p<.01	p<.01
Pelvic Incidence (PI) *	67.4 $^\circ$ \pm 20.9 $^\circ$	-	-	ns	ns
Sacral Slope (SS)	48.4 $^\circ$ \pm 12.2 $^\circ$	47.1 $^\circ$ \pm 9.2 $^\circ$	54.2 $^\circ$ \pm 7.8 $^\circ$	ns	p<.01
Thoracic Kyphosis (TK)	25 $^\circ$ \pm 16.1 $^\circ$	26.1 $^\circ$ \pm 13.7 $^\circ$	29.4 $^\circ$ \pm 13.8 $^\circ$	ns	ns
Lumbar Lordosis (LL)	61.5 $^\circ$ \pm 14.4 $^\circ$	44.2 $^\circ$ \pm 11.6 $^\circ$	51.1 $^\circ$ \pm 14.0 $^\circ$	p<.01	p<.01
SVA C7-S1	47.9 \pm 35.5 mm	33.7 \pm 26.4 mm	39.2 \pm 27.6 mm	ns	ns
Lumbosacral Angle (LSA)	13.9 $^\circ$ \pm 18.5 $^\circ$	-7.1 $^\circ$ \pm 12.5 $^\circ$	-3.7 $^\circ$ \pm 12.3 $^\circ$	p<.01	p=.01
L5-Slope (L5-S)	25.8 $^\circ$ \pm 7.3 $^\circ$	16.5 $^\circ$ \pm 5.8 $^\circ$	18.2 $^\circ$ \pm 6.6 $^\circ$	p<.01	p=.03
L4-Slope (L4-S)	28.1 $^\circ$ \pm 10.6 $^\circ$	19.2 $^\circ$ \pm 9 $^\circ$	25.2 $^\circ$ \pm 9.8 $^\circ$	p<.01	p<.01
Vertikale Distanz L5-S1	28.1 \pm 7.9 mm	45 \pm 6.6 mm	44 \pm 7.4 mm	p<.01	ns
L4-Tilt	4.2 $^\circ$ \pm 4.6 $^\circ$	3.5 $^\circ$ \pm 3.5 $^\circ$	3.6 $^\circ$ \pm 3.5 $^\circ$	ns	ns
C7-CSVL	11.6 \pm 11.7 mm	10.6 \pm 7.5 mm	8.3 \pm 6.8 mm	ns	ns
ODI (%)	-	-	11.9 \pm 10.6	-	-
SF-36 PCS	-	-	49.2 \pm 8.7	-	-
VAS-Rücken	-	-	2.8 \pm 2.7	-	-
VAS-Bein	-	-	1.5 \pm 2.1	-	-

Tab. 3: Radiologische und klinische Ergebnisse von 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis.

ODI = Oswestry Disability Index, SF-36 PSC = SF-36 score physical function component, VAS = Visual analog scale, * PI von N = 72 valide Patienten

3.2.2.1 Pelvic Incidence (PI)

Der Wert für PI bleibt nach Erreichen des Erwachsenenalters bzw. nach Erreichen der körperlichen Reife stabil und verändert sich nicht mehr, sodass der Wert für PI der präoperativen Messung für die Messungen nach der OP und zu postoperativen Nachuntersuchungszeitpunkten übernommen werden kann. Das Resultat zeigte durchschnittlich eine PI von $67.4^\circ \pm 20.9^\circ$, Range 72° (n = 72).

In der statistischen Auswertung zeigte PI eine inverse Korrelation zu SF-36-PCS ($r = -.39$, $p = .01$), und eine positive Korrelation zum ODI (%) ($r = .38$, $p = .01$). Diese Korrelation zeigt, dass Patienten mit erhöhtem PI bei HSG schlechtere klinische Ergebnisse zeigen. Diese sind in Abb. 27 graphisch in einem Wolkendiagramm dargestellt.

Ebenso zeigen sich schlechtere klinische Ergebnisse bei erhöhtem Alter (ODI, SF-36-PCS, VAS-Bein, alle $r > .35$, $p < .01$).

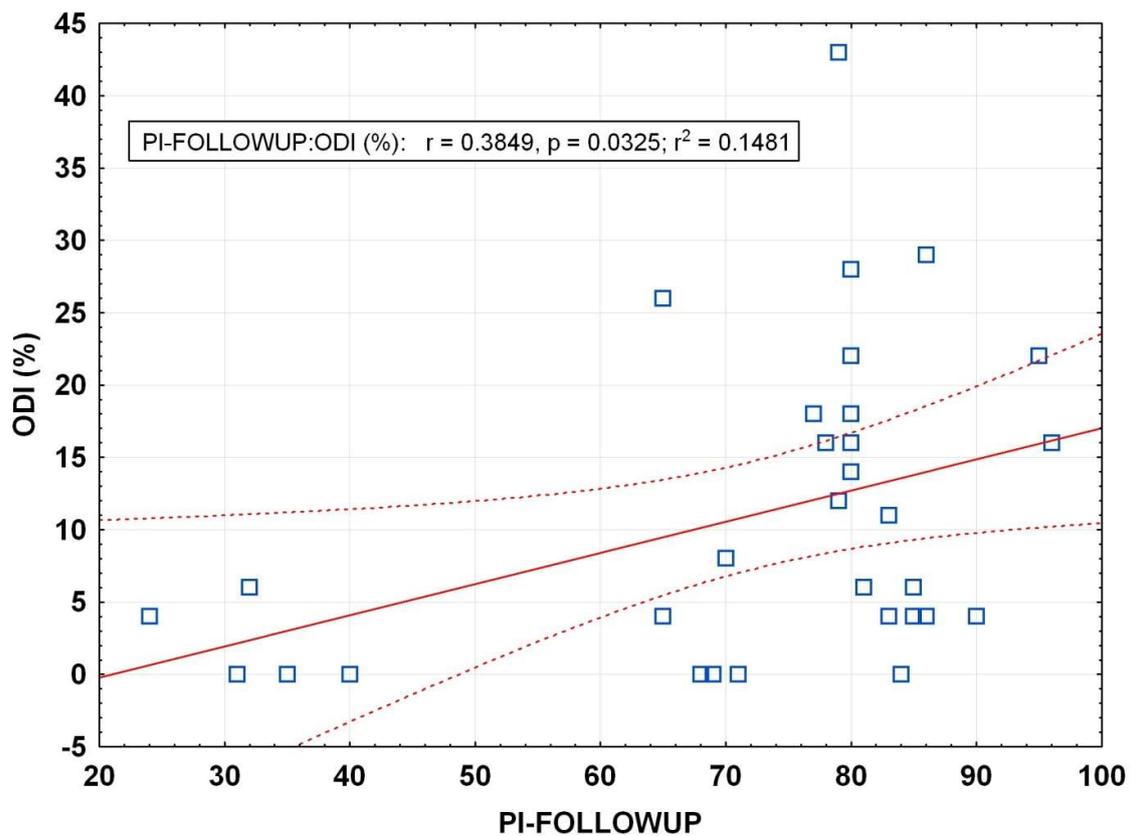
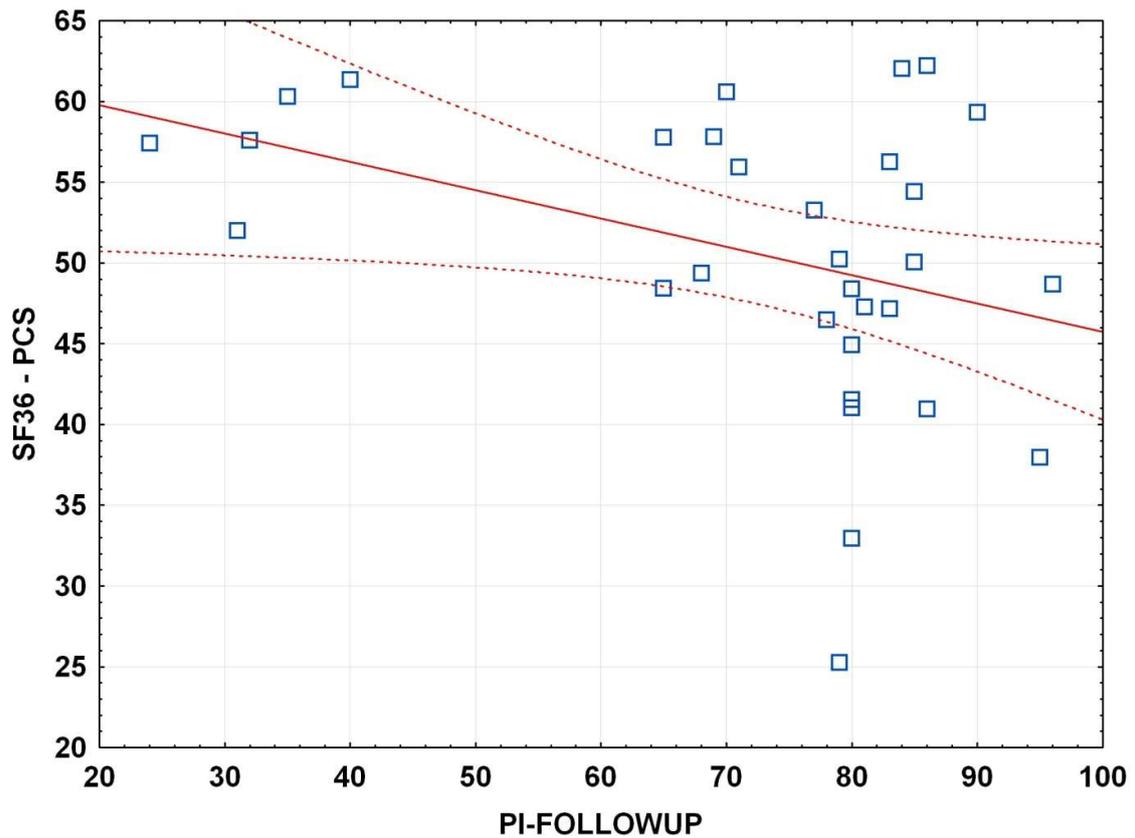


Abb. 27: Wolkendiagramm zur Korrelation von PI (FU) zu SF-36-PCS und ODI (%): statistische Korrelation von PI zu klinischen Ergebnissen (SF-36-PCS und ODI (%)) zum Zeitpunkt des Follow-Up. Die rote Linie kennzeichnet die Regressionslinie als Mittelwert mit einem 95 %-Konfidenzintervall (gepunktete Linie).

3.2.2.2 Sacral Slope (SS)

Bei SS zeigten sich bei 101 Patienten bei allen drei Messungen (präop, postop, FU) signifikante Unterschiede im Vergleich zur Nachuntersuchung. Von präoperativ mit $48.4^\circ \pm 12.2^\circ$, Range 66 verändert sich das Ergebnis der Messung zu FU mit $54.2^\circ \pm 7.8^\circ$, Range 37 (Differenz: $-5.85^\circ \pm 1.16$, $p < .01$). Auch von postoperativ zur Follow-Up Messung zeigt sich ein signifikanter Unterschied ($p < .01$). In Abb. 29 sowie Tab. 3 ist das Resultat der Messungen graphisch und tabellarisch dargestellt.

Statistisch zeigt sich eine starke Korrelation mit den klinischen Ergebnissen der validierten Fragebögen wie folgt: VAS-Rücken ($r = .45$, $p = .002$), VAS-Bein ($r = .48$, $p = .001$), SF-36-PCS ($r = -.41$, $p = .004$) und ODI (%) ($r = .42$, $p = .004$)

3.2.3 Sagittales spinales Alignment

Statistisch zeigt sich eine signifikante Korrelation der lumbosakralen Kyphose (L4-S, LSA) mit dem spinalen Alignment (TK, LL und SVA) postoperativ und zum FU. Diese sind graphisch in Abb. 28 dargestellt.

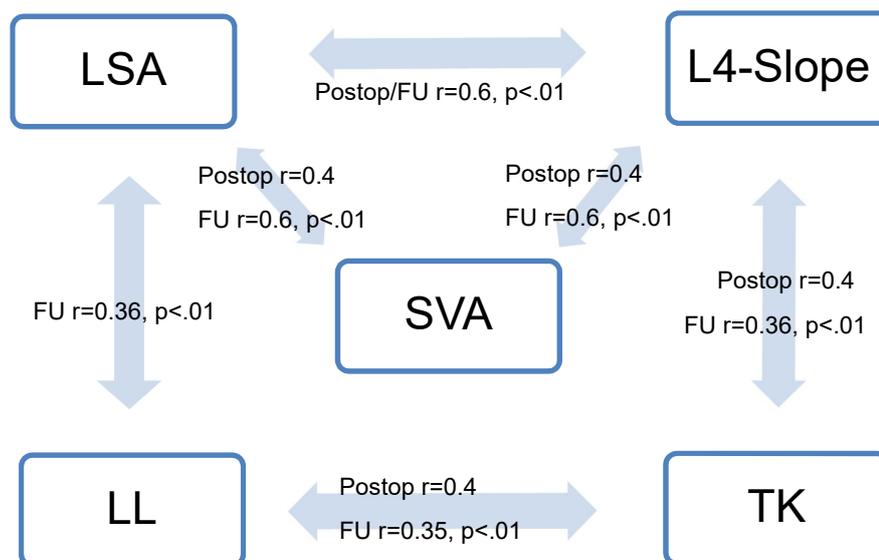


Abb. 28: Signifikante Korrelation zwischen Variablen der lumbosakralen Deformität (LSA, L4-Slope) und des spinalen Alignments (SVA, LL, TK)

Patienten, die eine komplette Listhesen-Reposition erreichen, zeigten zum Follow-up einen signifikant höheren Wert für LL (55° vs. 49° , $p = .03$), während präoperativ LL keinen signifikanten Unterschied zeigt (63° vs. 61° , ns).

In Tab. 3 (Seite 41) sind die radiologischen Ergebnisse aller Patienten zusammengefasst. Die graphischen Darstellungen in Abb. 29 zeigen die Veränderung über den Studienzeitraum von Parametern der lumbosakralen Deformität und des globalen Alignments. Hier ist die Wechselbeziehung der geometrischen Veränderungen nach einer Operation sowie bei Reposition der hochgradigen Spondylolisthesis sichtbar.

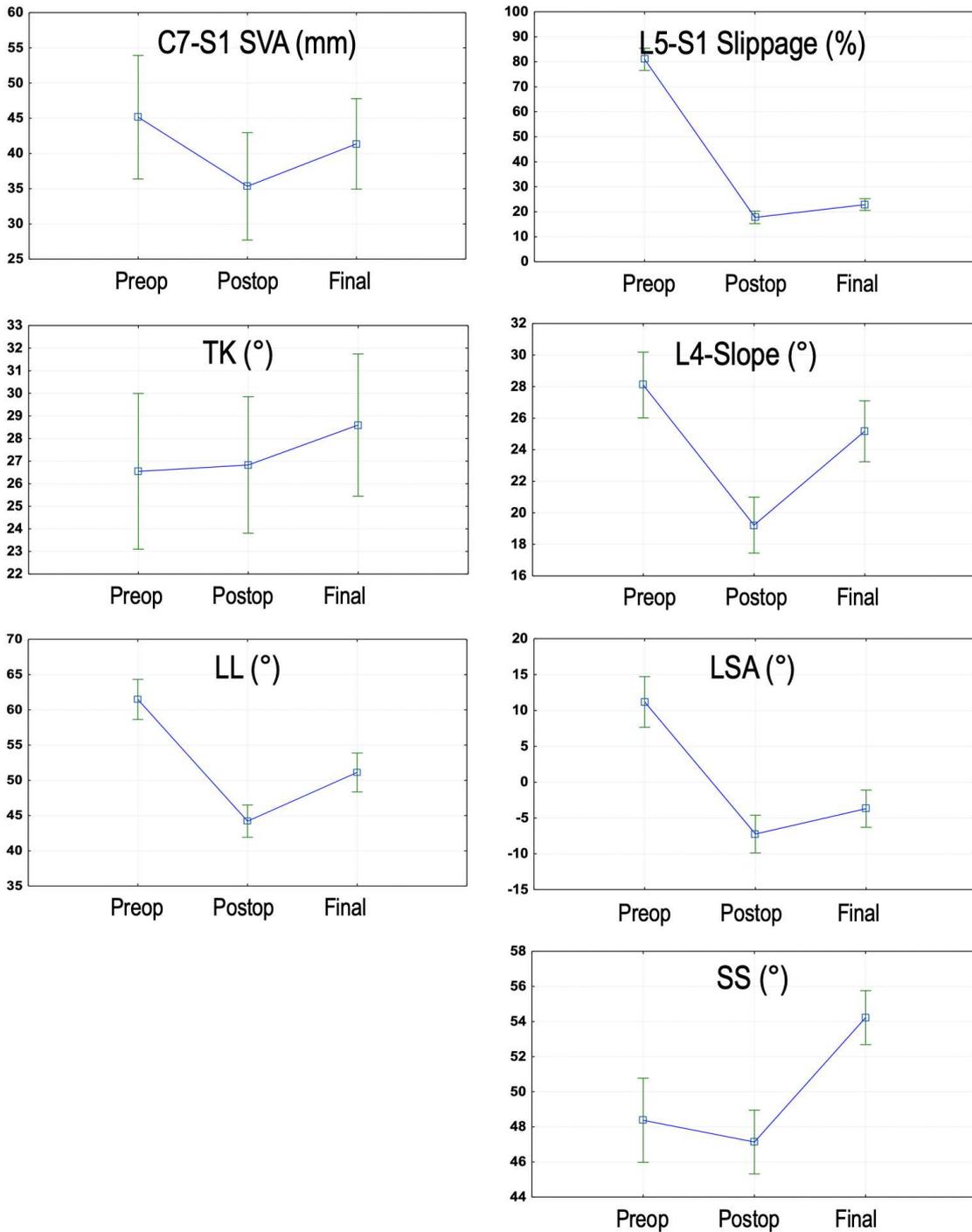


Abb. 29: Veränderung der radiologischen Parameter nach OP für 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis über den gesamten Untersuchungszeitraum (präop, postop, FU): Jeder Graph zeigt den ungewichteten Mittelwert, Vertical Bars kennzeichnen das 95 %-Konfidenzintervall für die Variablen gemessen präoperativ, postoperativ und beim letzten Follow-Up.

3.2.3.1 Lumbosakrale Kyphose (LSA und L4-Slope)

Die lumbosakrale Kyphose wird durch LSA und L4-Slope beschrieben. LSA stellt den Übergang zwischen Lendenwirbelsäule und Sakrum dar. L4-Slope beschreibt den Winkel von L4 im lumbosakralen Gefüge. Präoperativ zeigt sich der lumbosakrale Winkel (LSA) durchschnittlich bei $13.9^\circ \pm 18.5^\circ$, im Vergleich zu postoperativ bei $-7.1^\circ \pm 12.5^\circ$ und FU bei $-3.7^\circ \pm 12.3^\circ$, der sich im Verlauf leicht rückläufig darstellt.

Eine signifikante Verbesserung der präoperativen lumbosakralen Deformität konnte erreicht werden. Die Reduktion des Winkel LSA war $23^\circ \pm 13.4^\circ$ ($p < .01$) und bei L4-Slope $13.2^\circ \pm 8.2^\circ$ ($p < .01$). Der Anstieg der vertikalen Distanz L5-S1 war 11 ± 9 mm ($p < .01$).

In Abb. 29 auf S. 46 sind die Messungen graphisch dargestellt und in Tab. 3 aufgelistet.

Klinische Ergebnisse von insgesamt 46 Patienten zeigen eine signifikante Korrelation zwischen den radiologischen Messungen der lumbosakralen Kyphose und den Fragebögen bzgl. der Lebensqualität (VAS-Bein, VAS-Rücken, SF-36-PCS, ODI (%)). LSA präoperativ zeigt eine starke Korrelation mit klinischen Resultaten: VAS-Bein ($r = -.46$, $p = .01$), VAS-Rücken ($r = -.34$, $p < .01$), SF-36-PCS ($r = .46$, $p = .01$) und invers korrelierend mit ODI (%) ($r = -.47$, $p = .02$). Dies deutet auf eine kleinere lumbosakrale Kyphose zum Follow-Up. Die statistischen Wechselwirkungen der Veränderung von LSA und den klinischen Ergebnissen (ODI, SF-36-PCS) sind graphisch in Abb. 30 zu sehen. Hier zeigt sich, dass eine Häufung von LSA um den Nullpunkt mit einer höheren Lebensqualität (hoher SF-36-PCS und niedriger ODI (%)) korreliert, von vereinzelt Ausreißern abgesehen.

Zum Follow-Up zeigt LSA zudem eine inverse Korrelation mit VAS-Rücken ($r = -.4$; $p = .01$) im Vergleich zur präoperativen inversen Korrelation mit VAS-Bein.

Des Weiteren zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen LSA und dem Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation präoperativ ($r = .61$ und $r = .63$; $p < .01$).

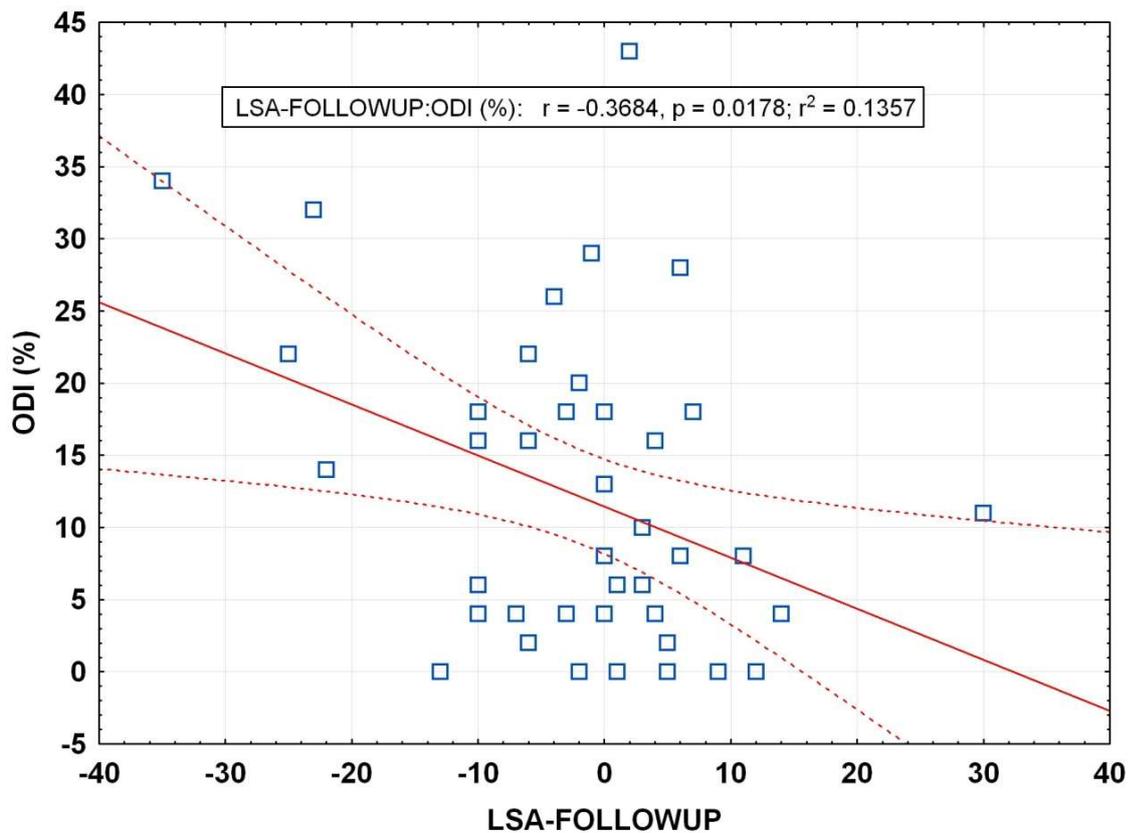
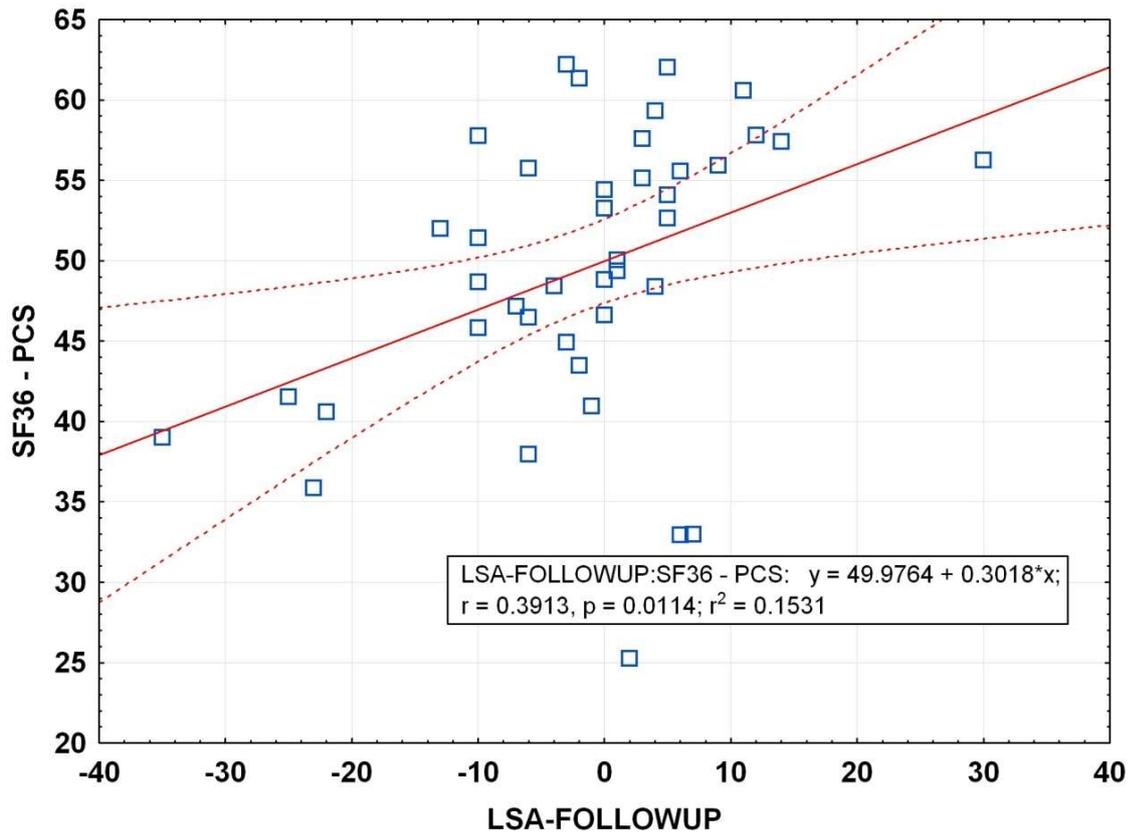


Abb. 30: Statistische Korrelation von LSA (FU) und klinischen Ergebnissen (ODI (%) und SF-36-PCS): Die rote Linie kennzeichnet die Regressionsgerade mit dem 95 %-Konfidenzintervall (gepunktete Linie) für die Mittelwerte (MEANS).

3.3 Chirurgische Ergebnisse

3.3.1 Operation

Das Patientenkollektiv von 101 Patienten wurde entweder mit einer 360°-Strategie (dorso-ventrales Verfahren, D-V, 360°-Gruppe) oder mit einer 540°-Strategie (ventro-dorso-ventrales Verfahren, V-D-V, 540°-Gruppe) versorgt. Die 360°-Gruppe besteht aus 40 Patienten, die 540°-Gruppe aus 61 Patienten.

Im Abschnitt Operative Therapie 1.1.4.2 (S. 11) sowie im Kap. 2.2 (S. 25) sind die verschiedenen OP-Techniken näher erläutert.

Es erfolgte eine Analyse bzgl. des D-V-Verfahrens, im Vergleich zur V-D-V-Technik. Hier zeigt sich für die 360°-Gruppe ein signifikant niedrigerer Listhesegrad präoperativ (MD 3.5 ± 0.7 vs. 4.0 ± 0.9 ; $p < .01$, L5-Translation 74 % vs. 85 %, $p = .03$) im Vergleich zur 540°-Gruppe. Ebenso zeigte sich ein signifikanter Unterschied bei der 360°-Gruppe für LSA präoperativ (präop: $7.9^\circ \pm 19.7^\circ$ vs. $17.1^\circ \pm 17.1^\circ$; $p = .01$). Postoperativ konnte dadurch ein besseres Ergebnis für LSA erzielt werden (postop: $-10.9^\circ \pm 12.9^\circ$ vs. $-4.9^\circ \pm 11.7^\circ$; $p = .028$; FU: $-8.2^\circ \pm 12.9^\circ$ vs. $-1.0^\circ \pm 11.2^\circ$; $p < .01$).

Signifikant seltener traten Major-Komplikationen in der 360°-Gruppe im Vergleich zur 540°-Gruppe (25 % vs. 48 %; $p < .01$) auf. Bei der 360°-Gruppe war eine Instrumentierung UIV>L5 (31 % vs. 52 %; $p = .035$) signifikant seltener notwendig.

Bei 17 Patienten wurde eine partielle oder komplette Korporektomie (L5-KE) durchgeführt. Hier zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied im Bezug auf den Listhesegrad nach Meyerding präoperativ (4.6 ± 0.7 bei L5-KE vs. 3.6 ± 0.8 ; $p < .01$) sowie für LSA ($30.1^\circ \pm 15.4^\circ$ bei L5-KE vs. $10.5^\circ \pm 17.4^\circ$ ohne L5-KE; $p < .01$). Bei Patienten mit L5-KE findet ebenfalls häufiger eine Revisionsoperation statt (Anzahl Revisions-OPs 1.6 ± 0.7 mit L5-KE vs. 0.8 ± 0.6 ohne L5-KE; $p < .01$).

3.3.2 Instrumentierte Segmente

Bei 56 Patienten war der oberste instrumentierte Wirbelkörper (UIV) L5, bei 45 Patienten höher als L5. Der letzte instrumentierte Wirbelkörper war S1 bei 94 Patienten und S1-S2 bei 7 Patienten. Die Anzahl der instrumentierten Segmente betrug 1.6 ± 0.7 .

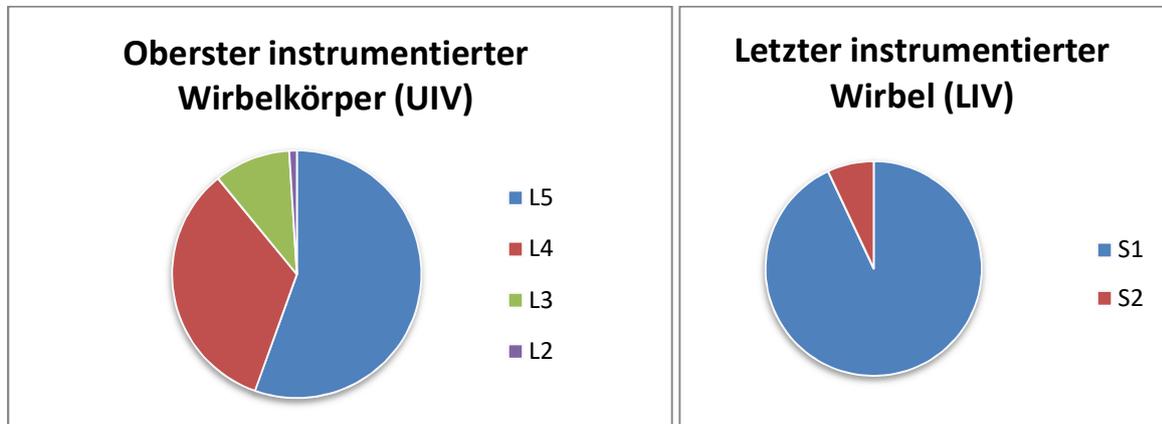


Abb. 31: Darstellung des obersten (links) und untersten (rechts) instrumentierten Wirbelkörper

UIV>L5 zeigte sich signifikant häufiger in der 540°-Gruppe im Vgl. zur 360°-Gruppe (52.3 % vs. 30.6 %; $p = .035$). Die Anzahl der Revisionen ist signifikant höher bei UIV>L5 (1.2 ± 0.7 vs. 0.3 ± 0.5 ; $p = .01$; 87.1 % vs. 25.7 % $p < .01$). Signifikant häufiger kam es zu Major-Komplikationen bei UIV>L5 (100 % vs. 8.2 %; $p < .01$). Eine Pseudarthrose trat signifikant häufiger bei UIV>L5 (94.1 % vs. 34.5 %; $p < .01$) auf sowie eine partielle L5-KE (76.5 % vs. 38.1 %; $p < .01$).

Ebenso zeigte sich bei UIV>L5 ein signifikanter Unterschied bei Meyerding-Listhesegrad präoperativ (4.0 ± 0.9 vs. 3.6 ± 0.75 ; $p = .02$) und L5-Translation präoperativ ($87.1 \% \pm 26.3$ vs. $76.1 \% \pm 17.6$; $p = .01$). Der LSA zeigte sich bei UIV>L5 signifikant höher als bei UIV=L5 ($18.2^\circ \pm 19.9^\circ$ vs. $10.4^\circ \pm 16.7^\circ$; $p = .03$), ebenso L4-Slope (FU) ($28.1^\circ \pm 10.7^\circ$ vs. $22.8^\circ \pm 8.3^\circ$; $p < .01$). Die Anzahl der instrumentierten Wirbelkörpersegmente korrelierte mit dem Listhesegrad nach Meyerding präoperativ ($r = 0.36$; $p < .01$) bzw. mit der L5-Translation (%) ($r = 0.4$; $p < .01$).

3.3.3 Revisionseingriffe

Bei insgesamt 31 Patienten kam es nach der initialen OP zu einem operativen Revisionseingriff. Dabei war bei 23 Patienten eine weitere OP nötig, bei sieben Patienten musste zweimal eine Revision vorgenommen werden und lediglich in einem Fall waren drei OPs notwendig. In sechs Fällen war dieser Revisionseingriff innerhalb von drei Monaten nach der initialen OP nötig. 20 Patienten waren älter als 20 Jahre (durchschnittlich 38 Jahre) sowie 11 Kinder / Jugendliche.

Die Hauptindikationen für einen Revisionseingriff waren Pseudarthrose (17x), Wundinfekt (3x), Versorgung einer Anschlussinstabilität (8x), Re-Dekompression z. B. bei Epiduralhämatom oder zur Exploration bei FHP (5x), Implantatentfernung z. B. bei prominenter Instrumentation (2x) sowie weitere Indikationen.

Das durchschnittliche Alter zeigte sich nicht signifikant unterschiedlich in der Gruppe mit Revision vs. ohne Revisions-OP. Des Weiteren zeigt sich ein durchschnittlich längeres Follow-Up bei Patienten mit stattgehabter Revisions-OP im Vergleich zu Patienten ohne (70 Monate vs. 39 Monate, $p < .01$).

Patienten mit einer Revisions-OP haben präoperativ eine größere lumbosakrale Deformität. Der Listhesegrad nach Meyerding (4.0 ± 0.9 vs. 3.7 ± 0.8 , $p = .02$) und die L5-Translation ($89 \% \pm 29.2$ vs. $76 \% \pm 17.9$; $p = .01$) sind signifikant höher. Das LSA zeigt sich präoperativ signifikant höher bei Patienten mit nachfolgender Revisions-OP ($19.8^\circ \pm 20.9^\circ$ vs. $11.2^\circ \pm 16.8^\circ$; $p = .03$). Postoperativ sind ähnliche Messungen zu verzeichnen, was hinweisend für die Korrektur der präoperativ größeren Deformität in der Revisions-Gruppe ist. Die postoperative L4-Slope-Messung (23° vs. 18° , $p < .01$) ist ebenfalls signifikant größer in der Gruppe mit Revisions-OP, vergleichbar mit einem kyphotischeren lumbosakralen Alignment der Wirbelsäule.

Signifikant häufiger kam es zu einer Revisions-OP nach L5-Korporektomie (71 % vs. 23 %, $p < .01$) sowie bei Patienten mit Instrumentierung oberhalb von LWK 5 (UIV>L5) (60 % vs. 7 %, $p < .01$).

Zudem kam es bei Patienten mit Komplikationen signifikant häufiger zu Revisions-OPs (ja vs. nein) (67.7% vs. 25.7% ; $p < .01$). Ebenfalls gab es bei eingetretener Revisions-OP im Vorfeld ein signifikant häufigeres Auftreten von Major-Komplikationen (84 % vs. 20 %, $p < .01$), von Fußheberpareesen (54.8 % vs. 18.6 %; $p < .01$) und die Ausbildung von Pseudarthrosen (48.4 % vs. 2.9 %; $p < .01$). Bzgl. der Lebensqualität, gemessen an SF-36 und ODI, zeigte sich kein signifikanter, nachteiliger Unterschied, wenn eine Revisions-OP stattgefunden hat.

In der nachfolgenden Tab. 4 ist eine detaillierte Vergleichsanalyse der Subgruppe Revision JA versus NEIN zu sehen.

Parameter	Revision JA	Revision NEIN	p
	Mean ± 1SD	Mean ± 1SD	
	N=26	N=85	
Patientenalter (Jahre)	28.4±14.0	25.5±12.1	ns
SF-36 PCS	46.8±10.4	50.4±7.7	ns
ODI (%)	13.9±10.9	10.9±10.5	ns
Instrumentierte Segmente (n)	2.0±0.9	1.4±0.5	p<.001
Pelvic Incidence (°)	70.5±16.7	66.1±22.6	ns
SS-Präop (°)	46.3±12.5	49.3±12.0	ns
SS-Postop (°)	45.2±10.7	48.0±8.4	ns
SS-FU (°)	50.6±7.1	55.8±7.6	p=.001
TK-Präop (°)	22.9±16.3	25.9±16.0	ns
TK-Postop (°)	24.7±15.6	26.7±13.0	ns
TK-FU (°)	25.3±15.7	31.3±12.5	ns
LL-Präop (°)	64.5±17.2	60.2±12.9	ns
LL-Postop (°)	43.6±13.5	44.5±10.7	ns
LL-FU (°)	48.0±14.3	52.5±13.7	ns
SVA-Präop (mm)	52.9±40.9	45.8±33.0	ns
SVA-Postop (mm)	32.7±25.4	34.1±27.0	ns
SVA-FU (mm)	43.5±29.0	37.5±27.1	ns
MD-Präop	4.0±0.9	3.7±0.8	ns
MD-Postop	1.2±0.7	1.1±0.6	ns
MD-FU	1.5±0.6	1.4±0.6	ns
L5-Slip-Präop (%)	88.8±29.2	77.5±17.9	p=.02
L5-Slip-Postop (%)	18.5±12.6	17.4±12.7	ns
L5-Slip-FU (%)	25.9±12.0	21.5±11.8	ns
LSA-Präop (°)	19.8±20.9	11.2±16.8	p=.03
LSA-Postop (°)	-4.7±12.3	-7.9±12.5	ns
LSA-FU (°)	0.7±12.1	-5.0±12.1	p=.06
L4S-Präop (°)	31.7±11.9	26.5±9.5	p=.02
L4S-Postop (°)	22.9±9.5	17.6±8.3	p=.005
L4S-FU (°)	29.2±11	23.4±8.7	p=.005
L4-Tilt-Präop (°)	5.2±6.9	3.7±3.1	ns
L4-Tilt-Postop (°)	4.2±4.0	3.2±3.2	ns
L4-Tilt FU (°)	3.6±4.0	3.6±3.3	ns
CSVL-Präop (mm)	13.6±14.6	10.7±10.1	ns
CSVL-Postop (mm)	9.0±8.4	10.9±7.1	ns
CSVL-FU (mm)	10.4±7.8	7.3±6.1	p=.049

Tab. 4: Analyse der Subgruppe Revision JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten mit der Bedürftigkeit einer Revisions-OP bzw. ohne Revisions-OP. Abkürzungen siehe Methoden.

3.3.4 Major-Komplikationen

Es traten in 40 Fällen Major-Komplikationen gemäß der Einteilung nach Glassman (siehe Einleitung, (Glassman et al. 2007)) auf, in sechs Fällen Minor-Komplikationen und in 55 Fällen keine Komplikationen, graphisch dargestellt in Abb. 32. Einige Patienten hatten mehr als eine Komplikation.



Abb. 32: Anzahl der aufgetretenen Komplikationen

Anhand der aufgetretenen Komplikationen kann man zwischen perioperativ auftretenden Komplikationen (39 Fälle) und sich erst im Verlauf entwickelten Komplikationen (29 Fälle bis ca. drei Monate nach OP) unterscheiden. Patienten mit Major-Komplikationen hatten Fußheberparese (FHP) (30x), symptomatische Pseudarthrose L5/S1 mit / ohne Anschluss-Segment-Degeneration (17x), eine Anschluss-Segmentdegeneration ohne PA (1x), Wundheilungsstörungen (4x), intraoperative Verletzung der V. iliaca mit Wiederherstellung (1x), passagere Cauda-equina-Symptomatik durch ein epidurales Hämatom mit Erholung (2x), eine inkomplette chronische Blasen-Störungen (1x) sowie frühzeitigen Verlust der Reposition (1x).

Das Risiko einer Major-Komplikation stieg signifikant mit dem Ausmaß des erhöhten LSA präoperativ (19° vs. 11° ; $p = .04$), der hohen Pelvic Incidence (73° vs. 63° ; $p = .045$), einem hohen präoperativen Listhesegrad nach Meyerding (4.1 vs. 3.6 ; $p = .01$) sowie einer kleinen postoperativen Lendenlordose (42° vs. 46° ; $p = .045$). Des Weiteren besteht ein erhöhtes Risiko für Major-Komplikationen in der 540° -Gruppe im Vergleich zur 360° -Gruppe (48% vs. 25% ; $p < .01$). Außerdem kommt es signifikant häufiger zu Major-Komplikationen nach L5-Korporektomie (76% vs. 31% , $p < .01$), bei Instrumentierung oberhalb von L5 (100% vs. 8% ; $p < .01$) sowie bei Patienten mit Instrumentierung bis S2 (15% vs. 2% ; $p < .01$). Des Weiteren entstehen signifikant häufiger Major-Komplikationen nach Revisionsoperationen (84% vs. 20% ; $p < .01$). Patienten mit Major-Komplikationen haben durchschnittlich ein längeres Follow-up im Vergleich zu Patienten ohne Komplikationen (60 Monate vs. 41 Monate; $p = .02$).

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 5) sind detaillierte Vergleiche zwischen den Gruppen Komplikationen JA versus NEIN einsehbar.

Parameter	Komplikation JA	Komplikation NEIN	p
	Mean ± 1SD	Mean ± 1SD	
	N=40	N=61	
Patientenalter (Jahre)	28.3±14.7	25.2±11.2	ns
SF-36 PCS	46.4±9.7	51.3±7.5	ns
ODI (%)	14.4±11.3	10.1±9.9	ns
Instrumentierte Segmente (n)	1.9±0.8	1.3±0.5	p<.001
Pelvic Incidence (°)	73.9±15.7	62.5±23.1	p=.02
SS-Präop (°)	44.7±12.2	50.8±11.6	p=.01
SS-Postop (°)	43.3±10.3	49.7±7.5	p<.001
SS-FU (°)	52.0±7.1	55.7±7.9	p=.02
TK-Präop (°)	22.5±16	26.6±16.1	ns
TK-Postop (°)	25.7±14.1	26.4±13.7	ns
TK-FU (°)	26.5±14.3	31.3±13.3	ns
LL-Präop (°)	63.8±16	60.0±13.2	ns
LL-Postop (°)	41.4±12.3	46.1±10.8	p=.045
LL-FU (°)	49.7±14.1	52±14.0	ns
SVA-Präop (mm)	48.4±27.1	47.7±39.8	ns
SVA-Postop (mm)	32.7±29.8	34.4±24.3	ns
SVA-FU (mm)	43.0±26.0	36.6±28.7	ns
MD-Präop	4.1±0.9	3.6±0.8	p=.02
MD-Postop	1.1±0.7	1.1±0.6	ns
MD-FU	1.5±0.5	1.3±0.6	ns
L5-Slip-Präop (%)	88.4±27	76.2±17.6	p=.007
L5-Slip-Postop (%)	18.6±13.2	17.2±12.3	ns
L5-Slip-FU (%)	24.6±11.3	21.7±12.3	ns
LSA-Präop (°)	18.5±20.1	10.8±16.9	p=.04
LSA-Postop (°)	-7.4±9.8	-7.0(13.7)	ns
LSA-FU (°)	-2.8±10.3	-4.1±13.2	ns
L4S-Präop (°)	30.0±11.0	26.9±10.2	ns
L4S-Postop (°)	19.2±9.1	19.2±8.9	ns
L4S-FU (°)	27.8±10.5	23.4±9.0	ns
L4-Tilt-Präop (°)	4.8±6.1	3.8±3.4	ns
L4-Tilt-Postop (°)	3.2±3.0	3.7±3.7	ns
L4-Tilt FU (°)	2.9±3.1	4.0±3.7	ns
CSVL-Präop (mm)	11.3±10.3	11.8±12.6	ns
CSVL-Postop (mm)	10.3±7.5	10.7±7.6	ns
CSVL-FU (mm)	8.1±6.7	8.4±6.9	ns

Tab. 5: Analyse der Subgruppe Komplikation JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten mit und ohne Komplikationen (+/- COMPL). Abkürzungen siehe Methoden.

3.3.5 Lumbosakrale Pseudarthrose

Die lumbosakrale Pseudarthrose (PA), eine weitere Major-Komplikation, trat bei 17 von 101 Patienten auf. Dabei waren zehn Fälle im Segment L5-S1 und sieben Fälle in den Segmenten L4-S1. Bei PA in den Segmenten L4-S1 wurde initial bei zwei Patienten eine L5-Korporektomie (L5-KE) vorgenommen.

Eine univariate Analyse konnte keine kontinuierliche radiologische Variable identifizieren, die prädiktiv für die Entwicklung einer PA ist. Jedoch konnte nachgewiesen werden, dass Patienten mit einer kompletten Reposition der Spondylolisthesis (Meyerding-Grad 31 % vs. 12 %; $p = .08$ und L5-Translation 26 % vs. 14 %; ns) eine niedrigere Rate an PA aufwiesen. Bei sechs von 55 Patienten (11 %) mit einer kompletten Reposition des Listhesegrades nach Meyerding zeigte sich postoperativ eine PA, im Vergleich zu 11 von 46 Patienten (24 %) ohne Erreichen einer kompletten Listhesen-Reposition.

Es zeigt sich außerdem, dass es bei Auftreten einer Pseudarthrose signifikant häufiger zu Revisionseingriffen gekommen ist im Vergleich zu Patienten ohne PA (Anzahl Revisions-OPs bei PA 1.5 ± 0.6 vs. 0.7 ± 0.6 ; $p < .01$; Patient mit PA und Revisions-OP 48.4 % vs. PA ohne Revisions-OP 2.9 %, $p < .01$). Die Anzahl der instrumentierten Segmente ist bei Auftreten einer PA ebenfalls signifikant höher (1.9 ± 0.8 vs. 1.5 ± 0.7 ; $p = .04$). Häufiger lag eine PA bei Instrumentation bis oberhalb von L5 vor (36 % vs. 2 %; $p < .01$) sowie bei einer Instrumentation bis S2 (18 % vs. 5 %; $p = .05$). Ebenfalls signifikant häufiger tritt eine Pseudarthrose nach partieller Korporektomie auf (Anteil der PA: 35 % vs. 13 %; $p = .03$).

3.3.6 Fußheberparese

Die häufigste Major-Komplikation ist die Fußheberschwäche (FHP) als Komplikation durch die Dehnung bzw. Reizung der Nervenwurzel L5 im Rahmen der Repositionskorrektur des abgeglittenen Wirbelkörpers L5. Es kam in 30 Fällen (29 %) zu einer Fußheberparese, dabei in 27 Fällen (90 %) unilateral und in drei Fällen (10 %) bilateral (siehe Abb. 33). Bei 14 Patienten kam es im Verlauf zu einer kompletten Erholung der FHP (Kraftgrad $\geq 4/5$), in 15 Fällen zu einer nur partiellen Genesung (Kraftgrad $< 4/5$). In einem Fall konnte keine Besserung dokumentiert werden.

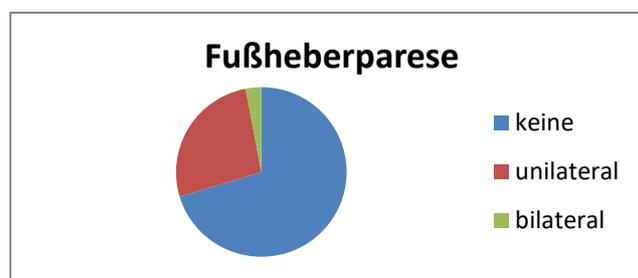


Abb. 33: Häufigkeit der Fußheberparese

Patienten mit einer Fußheberparese (FHP) (im Vergleich zum Nichtauftreten dieser Komplikation) hatten bei der radiologischen Messung einen signifikant höheren Wert

für Meyerding-Grad präoperativ (4.2 ± 0.9 vs. 3.6 ± 0.8 ; $p < .01$) sowie L5-Translation ($90.7 \% \pm 27.1$ vs. $76.8 \% \pm 19.0$; $p < .01$) sowie einen signifikant höheren Wert für Pelvic Incidence ($74.8^\circ \pm 15.3^\circ$ vs. $63.4^\circ \pm 22.6^\circ$; $p = .03$).

Patienten mit einer L5-Korporektomie erlitten häufiger eine FHP (59% vs. 24% ; $p < .01$), des Weiteren ist eine FHP signifikant häufiger bei Patienten mit $UIV > L5$ (67% vs. 0% ; $p < .01$) aufgetreten. Patienten mit einer Instrumentierung oberhalb L5 ($UIV > L5$) hatten präoperativ eine größere lumbosakrale Deformität (z. B. L5-Translation 87% vs. 76% ; $p = .01$; LSA 18° vs. 10° ; $p = .03$), postoperativ zeigte sich jedoch eine vergleichbare Korrektur im Vergleich zu den Patienten mit einer Spondylodese bis max. L5 ($UIV = L5$). Ebenfalls zeigt sich, dass eine FHP häufiger bei Patienten mit Revisionseingriff als ohne Revisioneingriff (54.8% vs. 18.6% ; $p < .01$) vorliegt.

In Bezug auf das lumbosakrale Alignment präoperativ zeigt sich ein signifikanter Unterschied für L4-Slope ($p = .02$) und LSA ($p < .01$) zwischen den Patientengruppen mit und ohne Auftreten von FHP. Postoperativ zeigt sich eine ähnlich ansteigende Korrektur von LSA und L4-Slope in der Gruppe mit FHP. Bei einer unilateralen FHP zeigen sich im Vergleich zum bilateralen Auftreten der FHP signifikant niedrigere Werte für LSA präoperativ ($20.3^\circ \pm 16.9^\circ$ vs. $50.3^\circ \pm 13.0^\circ$; $p < .01$). Eine univariate Analyse beschreibt, dass die Korrektur der lumbosakralen Deformität sich bei FHP ähnlich verhielt, insbesondere in den Veränderungen von L5-Translation, LSA ($23.3^\circ \pm 18.8^\circ$ vs. $9.8^\circ \pm 16.9^\circ$; $p < .01$) und L4-Slope ($31.8^\circ \pm 11.2^\circ$ vs. $26.5^\circ \pm 9.9^\circ$; $p = .02$). Gleichmaßen zeigte sich zwischen den Gruppen mit und ohne FHP ein signifikanter Unterschied zwischen präoperativen und postoperativen Messungen für die Reposition von L5-Translation (FHP+ 71% vs. 60% ; $p = .03$) als auch für die Korrektur von LSA (FHP+ 24° vs. 16° ; $p = .01$) und L4-Slope (FHP+ 11.8° vs. 7.6° ; $p = .03$). Die Pelvic Incidence (74.8° vs. 63.4° ; $p = .03$) zeigt sich in der FHP-positiven Gruppe ebenfalls signifikant höher. Korrespondierend ist Sacral Slope (SS) präoperativ signifikant kleiner (41.6° vs. 51.2° ; $p < .001$), welches dem bereits erwarteten Bild eines präoperativ mehr retrovertierten Beckens mit einer vertikaleren Stellung des Sakrums und einem unbalancierten Beckens widerspiegelt (Hresko et al. 2007; Mac-Thiong et al. 2019). Obwohl die Differenz zwischen präoperativer und postoperativer Messung für L5-S1-Höhe (vertikale Distanz) (17.1 mm vs. 15.7 mm, ns) keinen signifikanten Unterschied zeigt, ist bei der Gruppe FHP+ ein signifikanter Unterschied der vertikalen Distanz (25.2 mm vs. 29.3 mm; $p = .02$) präoperativ zu sehen. Postoperativ (44.7 mm vs. 54.4 mm, ns) und zum Follow-up (43.7 mm vs. 44.0 mm, ns) ist kein signifikanter Unterschied zu sehen. Dies deutet auf eine stattgehabte größere Distraction in der Gruppe mit FHP+ hin.

Insgesamt weisen diese Veränderungen auf eine größere 3D-Korrektur der Wirbelsäule bei Patienten mit FHP hin.

Nachfolgend zeigt die Tab. 6 detaillierte Vergleiche der Subgruppe mit und ohne Fußheberparese.

Parameter	Fußheberparese JA	Fußheberparese NEIN	p
	Mean ± 1SD	Mean ± 1SD	
	N=30	N=71	
Patientenalter (Jahre)	25.5±14.1	26.8±12.2	ns
SF-36 PCS	47.3±7.8	50.2±9.1	ns
ODI (%)	13.3±9.7	11.2±11.1	ns
Instrumentierte Segmente (n)	2.0±0.9	1.4±0.6	p<.001
Pelvic Incidence (°)	74.8±15.3	63.4±22.6	p=.03
SS-Präop (°)	41.6±11.9	51.2±11.1	p<.001
SS-Postop (°)	41.8±10.3	49.4±7.7	p<.001
SS-FU (°)	51.8±6.8	55.2±8.0	p=.04
TK-Präop (°)	19.8±16.2	27.2±15.6	p=.04
TK-Postop (°)	23.7±14.1	27.2±13.6	ns
TK-FU (°)	23.7±14.1	31.7±13.1	p=.01
LL-Präop (°)	63.6±17.1	60.6±13.2	ns
LL-Postop (°)	40.6±12.4	45.7±11.0	p=.04
LL-FU (°)	48.1±13.8	52.4±14.0	ns
SVA-Präop (mm)	53.2±25.3	45.8±38.9	ns
SVA-Postop (mm)	34.7±30.2	33.2±24.6	ns
SVA-FU (mm)	43.9±29.1	37.2±27.0	ns
MD-Präop	4.2±0.9	3.6±0.8	p=.005
MD-Postop	1.2±0.8	1.1±0.6	ns
MD-FU	1.4±0.5	1.4±0.6	ns
L5-Slip-Präop (%)	90.7±27.1	76.8±19.0	p=.004
L5-Slip-Postop (%)	19.7±14.0	16.9±12.0	ns
L5-Slip-FU (%)	21.9±10.0	23.3±12.7	ns
LSA-Präop (°)	18.7±15.9	8.9±16.5	p<.01
LSA-Postop (°)	-6.2±10.2	-7.6±13.2	p<.01
LSA-FU (°)	-4.7±10.3	-3.4±12.9	p<.01
L4S-Präop (°)	31.8±11.2	26.5±9.9	p=.02
L4S-Postop (°)	19.9±9.7	18.9±8.7	ns
L4S-FU (°)	28.7±11.3	23.7±8.7	p=.02
L4-Tilt-Präop (°)	5.6±6.8	3.6±3.3	p=.06
L4-Tilt-Postop (°)	3.3±3.1	3.6±3.6	ns
L4-Tilt FU (°)	2.9±3.2	3.9±3.6	ns
CSVL-Präop (mm)	12.2±11.4	11.4±11.9	ns
CSVL-Postop (mm)	10.5±7.8	10.6±7.5	ns
CSVL-FU (mm)	8.2±7.1	8.3±6.7	ns

Tab. 6: Analyse der Subgruppe Fußheberparese JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten bzgl. Auftreten von postoperativer Fußheberparese (+/-FHP). Abkürzungen siehe Methoden.

3.4 Klinisch-statistische Ergebnisse

Alle Patienten hatten ein Follow-up (FU), das durchschnittlich 47 Monate betrug. Für 46 Patienten mit einem 2-Jahres-FU – durchschnittlich 105 Monate – standen die Ergebnisse validierter Fragebögen zur Verfügung (ODI, SF-36-PCS und VAS).

Die Ergebnisse der klinischen Fragebögen wurden den radiologischen und chirurgischen Variablen statistisch gegenübergestellt.

3.4.1 Gruppenunterschiede zw. Patienten mit / ohne klinische Fragebögen

Es wurden Unterschiede zwischen Patienten mit und ohne Vorliegen eines klinischen Fragebogens für kontinuierliche und diskrete Studienparameter analysiert. Ein signifikanter Unterschied für kontinuierliche Parameter besteht nur für den Wert ‚Vertikale Distanz präop‘ $p = 0.049$ ($26.4 \pm 8,5$ mm vs. 29.5 ± 7.2 mm) sowie für den Wert ‚TC zum Zeitpunkt des FU‘ $p = 0.026$ ($10.1^\circ \pm 2,8^\circ$ vs. $15.4^\circ \pm 9.6^\circ$) im Vergleich der Gruppen mit und ohne Fragebogen. Bezüglich diskreter Parameter zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Es darf von einer Repräsentanz der Patientengruppe mit Fragebögen-Auswertung für jene ohne Fragebögen ausgegangen werden.

3.4.2 Korrelation zwischen klinischen und radiologischen Parametern

Die Analyse von klinischen Parametern (z. B. Lebensqualität, Schmerzangaben, etc.) und radiologischen Parametern ergab folgende Korrelationen:

Das höhere Alter zur ersten OP zeigt eine umgekehrte Korrelation im Bezug auf SF-36-PCS ($r = -.51$, $p = .00$) und eine positive Korrelation zum Resultat von ODI (%) ($r = .45$, $p = .002$) sowie zu VAS-Bein ($r = .35$, $p = .01$)

Es ergibt sich eine Korrelation zwischen Rückenschmerzen (VAS-Rücken) zwischen SS präop ($r = .45$, $p < .01$) und LSA FU ($r = -.38$, $p = 0.13$).

Zudem zeigt sich eine Korrelation zwischen Beinschmerzen (VAS-Bein) und SS präop ($r = .48$, $p = .001$), Meyerding präop ($r = -.36$, $p = .014$), LSA präop ($r = -.46$, $p = .001$).

SF-36-PCS korreliert mit PI ($r = .37$, $p = .035$), SS präop ($r = -.41$, $p = .004$), LSA präop ($r = .46$, $p = .001$).

ODI (%) korreliert zu PI ($r = .38$, $p = .033$), SS präop ($r = .42$, $p = .004$), LSA präop ($r = .47$, $p = .001$).

Die Korrelation der klinischen Ergebnisse zueinander zeigt sich in folgender Graphik (Abb. 34).

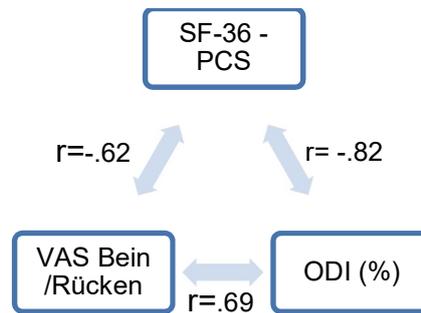


Abb. 34: Statistisch starke Korrelation zwischen klinischen Ergebnissen in Bezug auf Lebensqualität und Schmerzsituation

Weitere klinisch-radiologische Korrelationen wurden bereits im vorangegangenen Kapitel der radiologischen Variablen (PI, LSA etc.) dargelegt.

4 Diskussion

Die Studie über 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis analysierte und definierte Risikofaktoren für Major-Komplikationen, Fußheberparese sowie Revisionsoperationen anhand des Grades der lumbosakralen Deformität (Listhesegrad nach Meyerding mit L5-Translation (%)), der Korrektur der lumbosakralen Kyphose (LSA und L4-Slope) sowie weiterer chirurgischer Variablen (z. B. L5-Korprektomie).

4.1 Chirurgisches Outcome

Es gibt zahlreiche Studien, welche die unterschiedlichsten Varianten der operativen Versorgung von hochgradigen Spondylolisthesen analysieren. Bei dieser großen Menge an operativen Therapieoptionen nach Versagen bzw. Ausschöpfen der konservativen Therapie wird die optimale Behandlungsmöglichkeit kontrovers diskutiert. Die Studien analysieren jedoch häufig ein kleines Patientenkollektiv mit einem retrospektiven Studiendesign und ohne Fokus auf das sagittale Alignment, sodass sich ein Favorit nur schwer herauskristallisiert. Insgesamt zeigt sich jedoch der Trend einer kombinierten Therapie mit instrumentierter Fusion, Reposition der Spondylolisthesis und Dekompression.

In unserer Analyse mit 101 Patienten konnten diejenigen mit kompletter Listhese-Reposition (Meyerding <1, L5-Translation <20 %) bessere Ergebnisse der LL erreichen, zudem hatten diese Patienten eine geringere Rate an Pseudarthrosen und ein besseres klinisches Outcome (ODI, VAS, SF-36-PCS). Das bessere klinische Outcome korreliert mit dem Grad der Korrektur der lumbosakralen Kyphose (LSA, L4-Slope). Das Patientenkollektiv zeigte zu Behandlungsbeginn sowie postoperativ vergleichbare Ergebnisse wie in bisherigen Veröffentlichungen. Die Korrektur des Listhesegrades (L5-Translation in %) war in unserem Patientenkollektiv von 81 % auf 18 % des Listhesegrad, was einer etwas größeren Korrektur entspricht als in vorangegangenen Studien (75 % zu 33 % (Alzakri et al. 2019), 81 % zu 59 % (Martikos et al. 2019), 73 % zu 31 % (Mac-Thiong et al. 2019), 76 % zu 10 % (Ruf et al. 2006), 67 % zu 14 % (Lamartina et al. 2009)).

Beispielhaft ist im Folgenden eine Bilderserie unseres Patientenkollektivs (Abb. 35) zu sehen. Zwei weitere Fallserien in Kap. 7 ab Seite 78 zeigen ebenfalls Beispiele aus der operativen Versorgung von Patienten mit HGS.

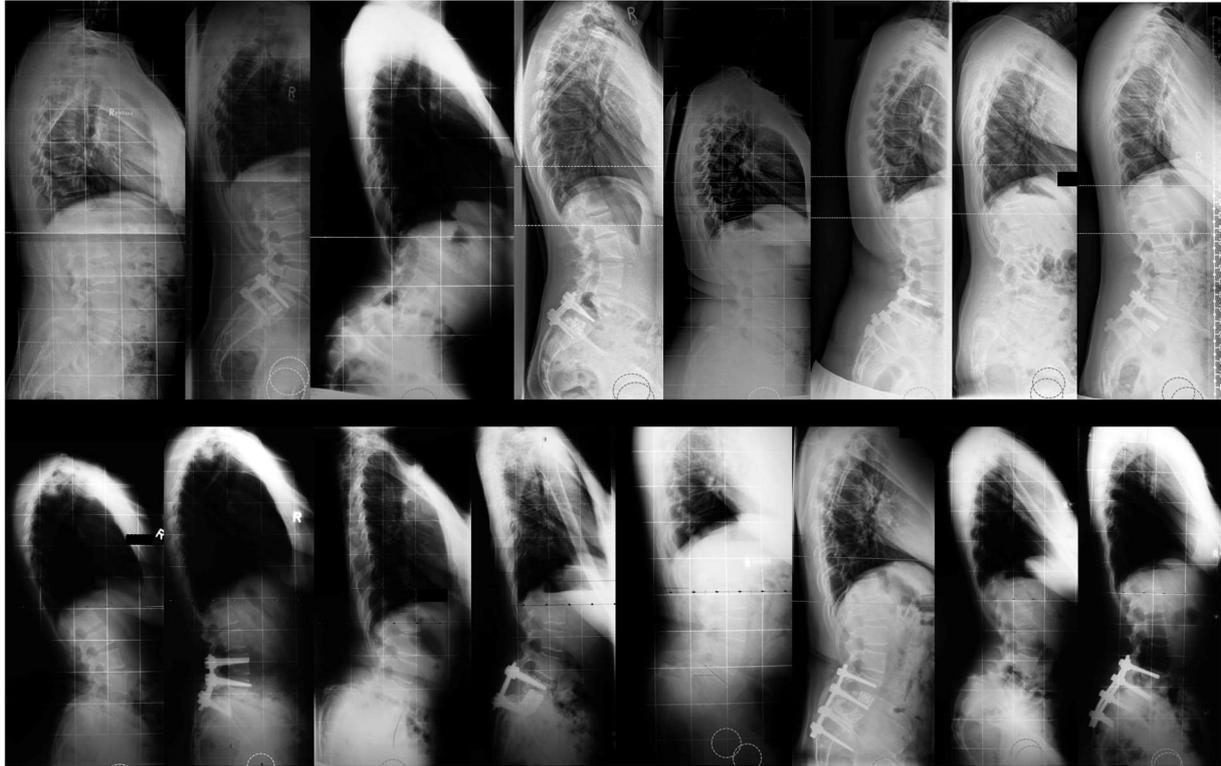


Abb. 35: Verschiedene Fallbeispiele von Patienten mit HGS verschiedener Schweregrade (je ein Röntgenbild-Paar mit präoperativem und postoperativem Zustand pro Patient) (eigenes Bildmaterial)

Die komplette Reposition des Listhesegrades nach Meyerding <1 wurde in unserem Patientenkollektiv bei 55 % erreicht. Eine kürzlich veröffentlichte Studie von Alzakri et. al. mit 60 Patienten beschrieb 50 % Patienten mit einer Reposition unter 50 % des Listhesegrades (entspricht Meyerding Grad 2) (Alzakri et al. 2019).

Weiterführend ist eine komplette Reposition des Listhesegrades nach L5-Korporektomie (29.4 % vs. 82.4 %; $p = .02$) signifikant seltener möglich. Gaines' Patientenkollektiv zeigte eine Reposition auf durchschnittlich 11 % L4-S1-Translation (38 % bei Harrington-Stab, 5 % bei transpedikulärem System) (Lehmer et al. 1994).

In Zusammenhang mit der Korporektomie, die in unserer Studie bei 17 Patienten durchgeführt wurde, zeigt sich LSA präoperativ deutlich höher als ohne L5-KE ($30.1^\circ \pm 15.4^\circ$ bei L5-KE vs. $10.5^\circ \pm 17.4^\circ$ ohne L5-KE; $p < .01$). Ebenso fällt präoperativ ein signifikant höherer Listhesegrad nach Meyerding bei Durchführung einer L5-KE auf (4.6 bei L5-KE vs. 3.6; $p < .01$).

Die Korrektur von LSA war in unserer Studie durchschnittlich 23° . Dieser Wert ist gleich bis leicht ansteigend, im Vergleich zu anderen Studien (LSA 28° (Ruf et al. 2006), 21° (Alzakri et al. 2019), 19° (Molinari et al. 1999), 17° (Mac-Thiong et al. 2019), 13° (Martikos et al. 2019)). In einer Studie von Mac-Thiong et al. hatten insg. 77 % der Patienten ein LSA $\geq 80^\circ$ (Mac-Thiong et al. 2019), in unserer Analyse waren es 96 % der Patienten (in unserer Messung entspricht dies einem LSA $<+20^\circ$).

Zur Verbesserung des spino-pelvinen Alignments ist die Wiederherstellung der Beckenbalance mit postoperativ pelviner Anteversion sowie Reposition der lumbosakralen Deformität (L5-S1) in eine physiologische Stellung erforderlich. Die Messergebnisse unserer Studie hierzu sind in der Graphik Abb. 29 auf Seite 46 sichtbar. Eine operative Reposition des Listhesegrades ist nach Angabe von Hresko, Labelle und Mac-Thiong vor allem bei hochgradigen Spondylolisthesen mit retrovertiertem und unbalanciertem Becken zu empfehlen (Labelle et al. 2011; Hresko et al. 2007; Mac-Thiong et al. 2008a; Labelle et al. 2008).

In der biomechanischen Analyse am Modell der Arbeitsgruppe von Wang und Labelle (2015) zeigte sich postoperativ bei unbalancierten Spondylolisthesen eine deutliche Zunahme der Deformation der LWS sowie eine höhere lokale Belastung auf das benachbarte Segment (Wirbelkörper und Bandscheibe) nach Fusion und Reposition des Listhesegrades (Wang et al. 2016).

Die Pelvic Incidence beträgt in unserer Studie 67° , während in zwei weiteren Studien Werte von 73° (Martikos et al. 2019) und 77° (Martiniani et al. 2012) gemessen wurden. Aufgrund des vor allem kindlichen Patientenkollektivs der Vergleichsstudien ist unser Wert für PI etwas kleiner als in den Vergleichsstudien (Alzakri et al. 2019; Hresko et al. 2007).

Die Anzahl der Patienten mit einer Instrumentierung UIV>L5 beträgt in unserer Studie 45 % und ist damit vergleichbar mit anderen Studien (32 % (Martikos et al. 2019), 37 % (Alzakri et al. 2019), 41 % (Faldini et al. 2014) und 54 % (Mac-Thiong et al. 2019)).

Das OP-Verfahren von Ferrero et al. kommt zu ähnlichen Ergebnissen wie unsere Analyse mit Verbesserung des sagittalen Alignments (LSA, L5-Translation) mittels dorsaler Spondylodese mit intrasakraler Fixation, Sakrumdom-Resektion und zirkumferentieller Fusion. Die Rate der Komplikationen zeigte sich ebenfalls vergleichbar, außer dem Ausbleiben von Pseudarthrosen. Dies wird anhand der zirkumferentiellen Fusion erklärt. Als Risikofaktor für eine PA wird eine persistierende lumbosakrale Kyphose $>90^\circ$ angegeben (Ferrero et al. 2018).

In unserer Studie wurden hauptsächlich Patienten mit einer dorso-ventralen (360°) (40 %) und ventro-dorso-ventralen (540°) (60 %) Spondylodese versorgt. Hier zeigte sich in der Analyse ein signifikant niedrigerer Verlauf des lumbosakralen Winkels (LSA) über alle Messungen hinweg in der 360° -Gruppe. Des Weiteren konnte eine signifikant niedrigere Rate an Major-Komplikationen bei der 360° -Gruppe festgestellt werden.

4.2 Klinisches Outcome

Alle 101 Patienten unserer Studie hatten zum Zeitpunkt des Follow-Up eine Fusion von L5-S1 bzw. nach L5-KE von L4-S1 erreicht.

In Bezug auf die gesundheitsbezogene Lebensqualität (HrQoL) zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen radiologischen Ergebnissen und dem klinischen Outcome. Der Mittelwert des ODI (%) bei 46 Patienten zum Follow-up war 12 % in unserer Analyse der klinischen Outcomes. Dies ist vergleichbar mit 8 % einer Studie mit 39 Patienten (Omid-Kashani et al. 2015) sowie 20 % einer Studie mit 25 Patienten (Gandhoke et al. 2017). Vor allem im Bereich der lumbosakralen Kyphose (LSA) konnte bei einer starken Korrelation zu klinischen Resultaten ein signifikant besseres Outcome beobachtet werden: VAS-Bein ($r = -.46$, $p = .01$), VAS-Rücken ($r = -.34$, $p < .01$), SF-36-PCS ($r = .46$, $p = .01$) und invers korrelierend mit ODI (%) ($r = -.47$, $p = .02$). Dies weist auf eine kleinere lumbosakrale Kyphose zum Follow-Up und somit auf eine einhergehende Verbesserung der Lebensqualität hin. Das steigende Alter und die höheren Werte von Pelvic Incidence (SF-36-PCS ($r = -.39$, $p = .01$), ODI (%) ($r = .38$, $p = .01$)) wirken sich jedoch negativ auf das klinische Outcome aus.

Alzakri et al. beschrieb in einer Analyse von 60 Kindern eine größere Verbesserung von SRS-22 (Scoliosis Research Society (SRS)-22 Fragebogens) bei Patienten mit postoperativer, niedriggradiger Spondylolisthese (<50 % nach Meyerding) (Alzakri et al. 2019). Eine andere Fallstudie anhand SRS-22 zeigte bei hochgradiger Spondylolisthese im Kindes- und Jugendalter im Vergleich zu einer konservativen Gruppe eine signifikant verbesserte Lebensqualität und Selbstbildnis in der interventionellen Gruppe (Bourassa-Moreau et al. 2013). In einer weiteren Studie wird eine Gesamtverbesserung von SRS-Scores, insbesondere der Lebensqualität und dem Selbstbildnis nach der OP, beschrieben – vor allem bei Patienten mit balanciertem Becken im Vergleich zu einer unbalancierten Beckenstellung (Mac-Thiong et al. 2019). Hierbei konnte eine Korrelation festgestellt werden, vor allem zur Verbesserung des Listhesegrades anstatt wie in unserer Studie zur lumbosakralen Kyphose (LSA). Eine Metaanalyse zum Vergleich von operativer und konservativer Therapie von hochgradiger Spondylolisthese im Kindes- und Jugendalter von Xue et al. zeigte ebenfalls, dass ein gutes Outcome für eine operative Versorgung bei hochgradigen Spondylolisthesen v. a. bei Patienten mit einer signifikanten Beeinträchtigung der Lebensqualität zu erreichen ist. Bei Patienten mit geringer Beeinträchtigung wurde hingegen nur eine geringe Besserung erzielt, die Lebensqualität wurde hier ebenfalls mittels standardisierten Fragebögen (SRS, SF, ODI) ermittelt (Xue et al. 2016). Vergleichbare Ergebnisse zeigt auch die Studie von Lundine, die ein verbessertes klinisches Outcome bei 24 operativ versorgten, kindlichen Patienten im Vergleich zu einer konservativen Therapie bei einer operativen Verbesserung der lumbosakralen Kyphose beschreibt (Lundine et al. 2014). Eine Langzeit-Analyse von Jalanko et al. zeigte ein gutes, klinisches Outcome (funktionell, radiologisch und Lebensqualität) zwischen Kindern (vor der Pubertät)

und Jugendlichen mit hochgradiger Spondylolisthesis nach instrumentierter Reposition und anteriorer bzw. zirkumferentieller In-Situ-Fusion. ODI und VAS zeigten sich signifikant besser zugunsten der Kinder. Der Listhesegrad zeigte sich hier postoperativ um 14 % rückläufig bei Kindern, bei Jugendlichen nur um 2 %. Ca. 20 % (Kinder 26 %, Jugendliche 16 %) zeigten eine Pseudarthrose, es wurde allerdings kein Effekt auf das Outcome beschrieben (Jalanko et al. 2011).

In unserer Studie konnte keine signifikante Korrelation zwischen dem Listhesegrad und dem klinischen Outcome beobachtet werden. Dies könnte damit zusammenhängen, dass durchschnittlich eine große Korrektur auf 18 % Listhesegrad und eine anatomische Reposition bei allen Patienten angestrebt wurde.

4.3 Major-Komplikationen

In unserer Studie mit 101 eingeschlossenen Patienten mit hochgradiger Spodylolisthesis und operativer Versorgung zeigt sich eine Gesamt-Rate von 40 % an Major-Komplikationen, gemäß der Einteilung nach Glassman (Glassman et al. 2007) (eingeschlossen Pseudarthrose-Bildung und Fußheberparese). Diese sind tabellarisch aufgegliedert in Kapitel 3.3.4, 3.3.5 und 3.3.6 ab Seite 53. Es zeigt sich eine signifikante Häufung von Major-Komplikationen bei Revisionsoperationen (84 % vs. 20 %; $p < .01$), nach L5-Korporektomien (76 % vs. 31 %, $p < .01$) und ausgedehnter Instrumentation der Spondylodese über L5 und bis S2 (UIV>L5: 100 % vs. 8 %; $p < 0.1$; LIVS2: 15 % vs. 2 %; $p < .01$). Im Zusammenhang mit dem spino-pelvinen Alignment zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Major-Komplikationen und einem erhöhten LSA präoperativ (18.5° vs. 10.8° ; $p = .04$), einer erhöhten Pelvic Incidence (73.9° vs. 62.5° ; $p = .02$) sowie ein höherer präoperativer Listhesegrad nach Meyerding (4.1 vs. 3.6; $p = .01$). Postoperativ zeigt sich eine kleine Lendenlordose (41.4° vs. 46.1° ; $p = .04$) bei erhöhter Rate an Major-Komplikationen.

Protektiv für die Entwicklung von Major-Komplikationen hingegen ist die 360°-Gruppe im Vergleich zur 540°-Gruppe (25.0 % vs. 47.7 %; $p = .02$). In der letzteren Gruppe waren auch die Patienten mit größerer präoperativer lumbosakraler Deformität und daher auch größeren Korrekturwerten.

In den nachfolgenden Kapiteln (4.3.1 und 4.3.2) werden die Komplikationen Fußheberparese und Pseudarthrose gesondert dargestellt und diskutiert.

Eine Analyse der Morbiditäts- und Mortalitäts-Daten der Scoliosis Research Society (SRS) zeigte, dass die operative Versorgung von hochgradiger Spondylolisthesis bei einem Studienkollektiv von 605 Kindern mit einem Komplikationsrisiko von ca. 10 % verbunden ist, und bei Patienten mit Reposition ca. 14 %, insbesondere das Auftreten von neurologischen Ausfallerscheinungen (ca. 10 %) nach Reposition des Wirbelkörpers zur Reduktion des Gleitvorgangs im Vergleich zur operativen Fusion der Wirbelkörper (Fu et al. 2011). Auch ist eine Korrelation zwischen dem steigenden

Patientenalter und der Komplikationsrate zu sehen, diese verdoppeln sich ab dem 60. Lebensjahr nach einer Fusionierung eines lumbalen Segments (Kunze et al. 2011).

Ein Instrumentationsversagen ist eine gefürchtete Komplikation der operativen Versorgung von hochgradigen Spondylolisthesen. Die Studien von Hresko et al. (2009) (19%), Martiniani et al. (2012) (0 %), DeWald et al. (2005) (5 %), Faldini et al. (2014) (12 %) und Ferrero et al. (2018) (25 %) zeigen Ergebnisse zwischen 0 bis 25 % Implantatversagen. In unserer Analyse mit 101 Patienten war das Implantatversagen mit 5 % im unteren Bereich der Vergleichsdaten. Diese Komplikation wird bei posteriorer Instrumentation und Fusion mit häufig einhergehendem Verlust des Repositionserfolgs dokumentiert, sodass eine anteriore Stabilisierung mittels Knochenspan oder Cage-Implantation empfohlen wird. Hierbei zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Fusionrate zwischen Patienten mit und ohne ventrale Stabilisierung (Molinari et al. 1999; Molinari et al. 2002).

Eine weitere Recherche der SRS Mortalitäts- und Morbiditäts-Studie mit 165 Patienten (88 Kinder und 77 Erwachsene mit HGS) untersuchte die Komplikationsrate nach HGS-Operationen. Hier wiesen 29 % der Patienten eine Komplikation auf, 12 % hatten neurologische Komplikationen (FHP, Cauda-Syndrom) und 17 % mussten sich einer Revisionsoperation unterziehen. 9 % der Patienten zeigten eine PA, dies wurde jedoch nicht als Komplikation erfasst (Kasliwal et al. 2012).

Revisionen nach HGS-Operationen wurden in mehreren, kürzlich veröffentlichten Studien etwas geringer beschrieben als in unserer Studie (31 %): 15 % (Faldini et al. 2014), 23 % (Hresko et al. 2009), 21 % (Martikos et al. 2019) und 17 % (Kasliwal et al. 2012). Eine weitere Studie jugendlicher HGS-Patienten beschrieb eine Revisionsrate von 10 %, bei einem Listhesegrad von durchschnittlich 81% L5-Translation (Ferrero et al. 2018). In unseren Studien sind allerdings viele Patienten mit einer Spondyloptose (Meyerding Grad 5, n = 28) oder Patienten mit einem Listhesegrad nach Meyerding von 4 (n = 25) eingeschlossen. Im Rahmen des Gaines-Verfahrens mit L5-KE bei Spondyloptose war bei 15 % der Patienten eine Revisionsoperation indiziert worden (Gaines 2005). In unserer Studie lag die Rate der Revisionsoperationen nach L5-KE bei 71 %.

Ähnlich wie in den vorangegangenen Studien beschrieben, liegt ein erhöhtes Risiko für Komplikationen in Zusammenhang mit Patienten mit größerer präoperativer lumbosakraler Deformität (MD-Grad/ L5-Translation, $p < .01$) und größerer Pelvic Incidence ($p = .02$) vor. Weitergehend hatten Patienten mit einer L5-KE ($p < .01$) oder $UIV > L5$ ($p < .01$) – z. B. bei Spondyloptose – eine größere Wahrscheinlichkeit, eine PA zu entwickeln oder Revision zu benötigen. Unsere Ergebnisse sind vereinbar mit den zuvor genannten Werten bei HGS, und betonen die Notwendigkeit für lumbopelvine Instrumentierung sowie besondere operative Techniken bei Patienten mit L5-KE oder bei HGS mit Indikation für $UIV > L5$. Eine Reduzierung der Lasten und Spannungen, die nach Reposition der HGS auf der lumbosakralen Wirbelsäule lastet,

ist notwendig, um die ansonsten damit einhergehende hohe Revisionsrate zu reduzieren. Dies steht wiederum im Zusammenhang mit Implantatversagen und Pseudarthrose. Bei 31 Patienten unseres Patientenkollektivs war eine Revision indiziert, davon 17 (55 %) aufgrund von Pseudarthrose.

Wie im nächsten Kapitel 4.3.1 diskutiert und in den Ergebnis-Kapiteln 3.3.3 und 3.3.5 analysiert wurde, ist vor allem die Entwicklung einer Pseudarthrose – z. B. bei nicht ausreichender Reposition des Listhesegrades oder nach Korporektomie – ein Risikofaktor für eine Revisions-OP.

4.3.1 Lumbosakrale Pseudarthrose

Die Pseudarthrose-Bildung als Bildung eines Falschgelenks zwischen den Wirbeln und einer damit nicht regelrechten Verknöcherung der Spondylodese ist eine bekannte Komplikation in der operativen Versorgung der hochgradigen Spondylolisthesen. In der Analyse unseres Patientenkollektivs mit 101 Patienten zeigte sich im postoperativen Verlauf bei 17 Patienten eine Pseudarthrose. Dies führte zu einem signifikanten Anstieg der Revisions-OPs ($p > .01$). Ein signifikanter Anstieg von PA zeigt sich auch nach L5-KE (35 % vs. 13 %, $p = .03$) sowie bei Instrumentierung $UIV > L5$ (36 % vs. 2 %, $p < .01$). Protektiv ist allerdings eine komplette Reposition der Spondylolisthesis (Meyerding-Grad 31 % vs. 12 %, $p = .08$ und L5-Translation 26 % vs. 14 %, ns). Bei 11 % mit einer kompletten Reposition des Listhesegrades nach Meyerding zeigte sich postoperativ eine PA im Vergleich zu 24 % der Gruppe ohne Erreichen einer kompletten Listhesen-Reposition. Zwei Reviews beschreiben ebenfalls ein verringertes Risiko für Pseudarthrose-Entwicklung bei vollständiger Reposition des Listhesegrades, durch Verbesserung der gesamten Biomechanik der Wirbelsäule, durch Korrektur der lumbosakralen Kyphose sowie durch eine Reposition des Gleitwirbels (Longo et al. 2014; Crawford et al. 2017).

Molinari et al. untersuchte bei kindlicher hochgradiger Spondylolisthesis drei verschiedene operative Zugänge bzgl. der Häufigkeit von Pseudarthrose. Hier zeigte sich eine erhöhte Rate an Pseudarthrose bei posteriorer In-situ-Fusion (45 %) sowie bei posteriorer Dekompression mit Instrumentation und Fusion ca. 29 % PA. Im Vergleich zur Versorgung mit Reposition und dorso-ventraler Instrumentierung wies die Gruppe keinen Fall von Pseudarthrose (0%) auf (Molinari et al. 1999). In einer retrospektiven Studie von Sailhan et al. zeigte sich eine Pseudarthrose-Rate von 19 % bei kombinierten posterior-anteriorem Zugang (Reposition, Fusion, ohne Dekompression) und bei alleinigem dorsalem Zugang von 5 %. Die Pseudarthrose war häufig einhergehend mit einem Verlust des Repositionsergebnisses, sodass eine operative Revision nachfolgte (Sailhan et al. 2006).

Eine weitere Studie zu HGS und Komplikationen beschreibt eine Pseudarthrose-Rate von 16 % bei einem Patientenkollektiv von 50 Personen. Die postoperativ

verbleibende, lumbosakrale Kyphose wird als ein Risikofaktor für PA beschrieben (Moreau et al. 2016).

In unserem Patientenkollektiv ist es mit einer kompletten Reposition des Listhesegrades unwahrscheinlicher, eine PA zu entwickeln. Dies spiegelt die Indikation für eine Revisionsoperation wider. Von 31 Patienten mit Revisions-OP jeglicher Art benötigten 17 Patienten (55 %) eine Revision aufgrund von PA.

In Zusammenschau der Ergebnisse ist die Reduktion der Pseudarthrose-Entstehung durch die vollständige Reposition des Listhesegrades unter Meyerding-Grad 1 sowie der Erhalt bzw. das Wiedererlangen des spino-pelvinen Alignments zu erreichen, und somit eine Verbesserung des Outcomes sowie eine Reduktion der Komplikationen möglich.

Die Ergebnisse unserer Analyse bzgl. Pseudarthrose sind in Kapitel 3.3.5 auf Seite 55 nachzulesen.

4.3.2 Fußheberparese

In unserem Patientenkollektiv mit 101 Patienten zeigte sich in 30 Fällen (29 %) eine postoperativ neu aufgetretene Fußheberparese, in 27 Fällen unilateral und in 3 Fällen bilateral. Bei 15 Patienten kam es zu einer partiellen Genesung des motorischen Defizits. In einem Fall konnte bis zum letzten Follow-up keine Besserung dokumentiert werden. Auch wenn es für die meisten Patienten eine passagere Komplikation bzw. Beeinträchtigung ist, bringt es für einige Patienten Revisionsoperationen mit sich. Eine FHP ist stets eine Quelle für Behinderung und verlängert die Erholung nach einer OP. Eine Komplikation wie FHP ist für den Patienten und den Operateur belastend. Unsere FHP-Rate von 29 % entspricht dem Mittelwert an FHP, anhand von Studien der vergangenen 20 Jahren als anhand der jüngsten Veröffentlichungen.

In mehreren Studien mit gleicher chirurgischer Versorgung zeigte sich eine Häufigkeit zwischen 50 % (Ferrero et al. 2018), 45 % (DeWald et al. 2005), 34 % (Moreau et al. 2016), 29 % (Schär et al. 2017), 18 % (Ruf et al. 2006), 15 % (Molinari et al. 1999) bis 9 % (Sailhan et al. 2006) von L5-Radikulopathien mit motorischen Defiziten, entsprechend einer FHP. Einige Studien berichten jedoch von deutlich niedrigeren Anteilen einer FHP. In einer SRS-Studie entwickelten 12 % der Patienten ein postoperativ neu aufgetretenes, neurologisches Defizit (Kasliwal et al. 2012). In der Multicenter-Studie von Mac-Thiong wird von Nervenwurzelläsionen in 10 %, und FHP in 7 % berichtet (Mac-Thiong et al. 2019).

Das Risiko einer postoperativen Fußheberparese ist nach Reposition und instrumentierter Fusion bei HGS von L5-S1 am ehesten durch eine Überdistraktion der Nervenwurzel von L5 erhöht. Es wird angenommen, dass es bei höherem Listhesegrad nach Meyerding und größerer operativer Reposition der Listhese

häufiger zu einer L5-Radikulopathie kommt. Diese Hypothese kann allerdings in einer Studie von Schär et al. nicht signifikant bestätigt werden. Eine nur partielle Listhesen-Reposition sowie eine vorsichtige Mobilisation postoperativ wurde empfohlen (Schär et al. 2017). Auch in unserer Studie lässt sich ein höherer präoperativer Listhesegrad nach Meyerding (4.2 vs. 3.6, $p < .01$; L5-Translation 90.7 % vs. 76.8 %, $p < .01$) bei Entwicklung einer FHP postoperativ beobachten.

Ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Fußheberparese besteht auch bei der Betrachtung der spino-pelvinen Ausrichtung mit präoperativ erhöhter L4-Slope (31.8° vs. 26.5° ; $p = .02$) und Pelvic Incidence (74.8° vs. 63.4° ; $p = .03$) und der vertikalen Distanz zwischen L5 und S1 (25.2 mm vs. 29.3 mm; $p = .02$). Hierbei zeigt sich eine zu große Lumbalkyphose und damit eine zu große Vorspannung auf die austretenden Nervenwurzeln L5. Patienten mit dieser großen, präoperativen Deformität der lumbalen Wirbelsäule sind prädestiniert dazu, eine perioperative Wurzelreizung zu erleiden und somit neurologische Ausfallerscheinungen – z. B. eine Fußheberparese – zu entwickeln. Neben L4-Slope und PI hat sich in unserer Studie LSA als Risikofaktor herauskristallisiert. Der lumbosakrale Winkel zeigt sich präoperativ signifikant erhöht (18.7° vs. 15.9° ; $p < .01$) bei Auftreten von FHP, jedoch signifikant niedriger bei unilateralem Auftreten der FHP im Vergleich zu bilateralem Auftreten (unilateral 20.3° vs. bilateral 50.3° ; $p < .01$). Dies spiegelt den vermehrten Zug auf die Nervenwurzeln wider. In einer Studie von Ferrero et al. zeigte sich eine bilaterale FHP in 15 % sowie in 35 % unilateral (insg. 50 % von 20 Patienten mit FHP) (Ferrero et al. 2018). Postoperativ nach Reposition zeigt sich im Bezug auf das spino-pelvine Alignment in unserer Analyse kein signifikanter Unterschied mehr.

Zur Vermeidung oder Reduktion einer L5-Radikulopathie wurde im klinischen Alltag ein intraoperatives, neurophysiologisches Monitoring (IONM) zunehmend erprobt. Das bietet die Möglichkeit der zeitnahen intraoperativen Reaktion bei einem positiven Signal, z. B. Entlastung der Nervenwurzeln oder Reposition von Schrauben etc. Schär et al. berichtet hier von 29 % mit einem postoperativen motorischen Defizit von L5 bei einer Serie von 17 Patienten. Ein Fall von 5 Patienten mit FHP konnte hierdurch korrekt vorhergesagt werden (Schär et al. 2017). Ähnliche Ergebnisse und Erfahrungen bzgl. der Vorhersagesicherheit von IONM zur Prognose eines postoperativen motorischen Defizits wurden auch durch andere Autoren geteilt (Fu et al. 2011). In unserer Studie stand kein intraoperatives Neuromonitoring zur Verfügung. Heutzutage ist dies zum Standard geworden.

Das Outcome mittels COMI-Fragebogen in der Studie von Schär et al. zeigte ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen Patienten mit und ohne postoperativ neu aufgetretenem, motorischem Defizit (Schär et al. 2017).

Eine retrospektive Fallanalyse von Gaines et al. mit 30 Patienten mit Spondyloptose mit einem Follow-Up über mehr als 30 Jahre berichtet von einer deutlichen Menge (75 %, 63 % bereits präoperativ) an Patienten mit neurologischem Defizit der L5-Nervenwurzel nach Operationen mit L5-Korporektomie mittels Gaines-Verfahren.

Im längeren Follow-Up seien diese insg. jedoch nur selten persistierend. Ebenso ist aufgrund der Vermeidung einer Distraction der Neuralstrukturen bei Reposition keine Blasen-, Mastdarm- oder Sexualdysfunktion zu verzeichnen (Gaines 2005; Lehmer et al. 1994). Obeid et al. führte bei sieben Patienten mit HGS und Spondyloptose eine L5-KE von dorsal unter Schonung ventraler Wirbelkörperanteile durch, zur Schonung des Gefäß-Nervenplexus ventralseitig und unter Verzicht auf eine Cage-Implantation. Eine deutliche Listhesenreposition und Korrektur der lumbosakralen Kyphose, ohne Implantatversagen oder PA und nur 1 FHP mit operativer Revision bei präoperativer Loptose mit 134% L5-Translation a. e. im Rahmen einer Überkorrektur, konnte beobachtet werden (Obeid et al. 2016). In unserer Studie zeigte sich ein erhöhtes Risiko zur Entwicklung einer FHP bei Patienten mit L5-Korporektomie (59 % vs. 24 %, $p < .01$) sowie bei Patienten mit $UIV > L5$ (67 % vs. 0 %, $p < .01$). Eine L5-KE ist nur bei den schwersten Formen einer HGS erforderlich, einhergehend ist eine ausgedehntere Manipulation im Bereich der nervalen Strukturen als bei niedriggradigeren Listhesen vorhanden.

Eine vergleichbare operative Technik zur Distraction und Reposition der Spondylolisthese wurde z. B. in der Studie von Omid et al. verwendet. Hier zeigt sich jedoch bei einem Patientenkollektiv von 39 Patienten mit eher niedriger präoperativer Listhesis von 59 % und einer Reposition auf 21 % Gleitvorgang bei FU sowie einer Korrektur von LSA um insg. 9° kein Fall von FHP (Omid-Kashani et al. 2015).

Obwohl man bisher keine signifikanten Unterschiede in der Entwicklung von FHP im Bezug auf Listhesegrad oder deren Reposition in einem Review der aktuellen Literatur finden konnte (Longo et al. 2014), besteht eine Übereinstimmung zwischen den Autoren einiger bereits genannten Studien, dass mit erhöhtem Risiko für die Listhesen-Reposition auch das Risiko für die FHP steigt (Ruf et al. 2006; Molinari et al. 1999; Moreau et al. 2016).

Die Anzahl von Revisionsoperationen aufgrund von FHP ist ebenfalls vergleichbar mit anderen Studien (Ruf et al. 2006; Molinari et al. 1999; Moreau et al. 2016). In unserer Studie war dies für fünf Patienten notwendig, meist aufgrund des drastischen Bildes am ersten postoperativen Tag mit FHP und einer begleitenden Radikulopathie. Im Rahmen der Revisions-OP wurden z. B. verbleibende Osteophyten an der posterioren L5-Endplatte entfernt oder ein Teil der L5-Pedikel reduziert, um die Einklemmungsgefahr der L5-Nervenwurzel nach der Reposition weiter zu verringern.

Patienten mit $UIV = L5$ ($n = 56$) unseres Patientenkollektivs wiesen keine FHP postoperativ auf. Dies ähnelt einer Kohorte mit geringer präoperativer, lumbosakraler Deformität. Hierbei wird eine geringere Korrektur der Listhesis benötigt, um das chirurgische Ziel einer kompletten Reposition zu erreichen.

Die Ergebnisse unserer Studien bzgl. Fußheberparese sind im Kapitel 3.3.6 auf Seite 55 zu finden.

In Zusammenschau der Ergebnisse und im Vergleich mit der aktuellen Literatur ist eine Remission der FHP in den meisten Fällen im Rahmen der postoperativen Erholung ohne Revisionsoperation möglich. Im Spontanverlauf der FHP zeigte sich nur ein Patient ohne Remission in unserer Studie. Zur Entstehung bzw. Vermeidung einer FHP ist eine Überdistraktion im Rahmen der operativen Reposition zu vermeiden.

4.4 Risikofaktoren für Komplikationen nach HGS-Reposition

In Zusammenschau der klinischen und radiologischen Parameter und deren Korrelationsanalyse kristallisieren sich mehrere Risikofaktoren heraus, die prädiktiv zur Beurteilung des Outcomes der operativen Versorgung von hochgradigen Spondylolisthesen und -Liposen verwendet werden können.

Die aktuelle Studie bestätigte die bereits durch vorangegangene Studien festgestellten Risikofaktoren. Hier ist eine präoperativ bestehende, große lumbosakrale Deformität, die intraoperative Korrektur von Listhesegrad und lumbosakraler Kyphose sowie eine L5-KE, die mit einer verlängerten Instrumentierung (UIV>L5) vergesellschaftet ist, hervorzuheben. Neu hinzugekommen zur Liste der Risikofaktoren ist die Überdistraktion im Rahmen der HGS-Reposition. Wie bereits im Kapitel 4.3.2 auf Seite 67 sowie dem dazugehörigen Ergebnis-Kapitel 3.3.6 analysiert wurde, erscheint das Risiko einer Fußheberparese abhängig vom Ausmaß der Korrektur der lumbosakralen Kyphose, und ist v. a. bei Überdistraktion von L5-S1 – z. B. nach L5-Korporektomie – erhöht. Dies erklärt sich durch eine zu große Lumbalkyphose und eine damit einhergehende, schrittweise zunehmende Vorspannung auf die Nervenwurzel L5, die durch die Distraktionskräfte bei Reposition auftritt. Eine Studie zur HGS-Reposition zeigte, dass die erhöhte Dehnung der L5-Nervenwurzel vor allem in der zweiten Hälfte des Repositionsvorganges zu beobachten ist, während die Korrektur von LSA zu einer Entspannung des Zugs auf die L5-Nervenwurzel führt. Dies könnte zur Reduzierung eines L5-Nervenwurzelschadens führen (Petrao et al. 1996). In unserer Studie zeigte sich der lumbosakrale Winkel bei Auftreten von FHP präoperativ signifikant erhöht, wobei eine Differenz von LSA zwischen unilateralem und bilateralem Auftreten der FHP festgestellt werden konnte.

Obeid et al. beobachtet eine Entspannung der häufig chronisch gedehnten Nervenwurzeln durch eine Verminderung der vertikalen Distanz L5-S1, im Rahmen einer partiellen L5-KE (Obeid et al. 2016). Auch die postoperative Lagerung in Knie- und Hüft-Beugung auf einem Kissen kann die Spannung mit L5-Nervenwurzel-Irritation verringern (Tilan et al. 2017). Intraoperativ lässt sich mit diesen Erkenntnissen bereits eine Erleichterung der Nervenwurzel-Dehnung durch Lagerung in Bauchlage erreichen.

In unserer Studie wurde ein signifikanter Anteil der Distractionskräfte dazu verwendet, um eine komplette Listhese-Reposition zu erreichen. Wir haben die Wechselwirkungen zwischen dem Auftreten einer FHP und der erhöhten vertikalen Distanz von L5-S1 analysiert. Hier war die Veränderung der vertikalen Distanz zwischen prä- und postoperativen Werten nur ein Trend, ein signifikanter Unterschied zeigte sich jedoch zwischen Gruppen mit oder ohne FHP ($p=.02$). Diese Erkenntnis könnte mit der operativen Technik verbunden sein, die bei allen Patienten angewendet wurde. Die Technik impliziert eine Distraction und nach dorsal gerichtete Translation. In vielen Fällen war eine Distraction von L5-S1 notwendig, um eine Reposition zu erreichen, und eine finale Kompression nach erreichter Reposition des Segments konnte die initial distrahierte Distanz nicht mehr ausreichend verringern. In unserer Studie stieg die vertikale Distanz L5-S1 in der Regel mit dem chirurgischen Release an. Die dorsale Distraction und Translation nach dorsal und Verriegelung in korrigierter Position hatte in Zusammenschau eher einen ventral öffnenden Mechanismus zur Folge anstatt einer dorsalen Verkürzung.

Eine große, präoperative Wirbelsäulen-Deformität ist für die Entwicklung einer perioperativen Fußheberparese prädestiniert. Neben LSA hat sich auch eine präoperativ erhöhte Pelvic Incidence als Risikofaktor für FHP herauskristallisiert. Labelle beschreibt eine direkte Korrelation der pelvinen Anatomie (PI) und dem Schweregrad der Spondylolisthesis. Bei Veränderungen der Beckenposition reagiert die Wirbelsäule mit Adaption der lumbalen Lordose zum Erhalt der Balance mit Anstieg von LL und SS (Labelle et al. 2005). Bei Patienten mit einem zunehmend retrovertierten Becken (PI präop größer, SS niedriger bzw. Sakrum vertikaler und PT größer) und sinkender Balance könnte die Beckenposition die Ursache für eine eingeschränkte Fähigkeit zur Anpassung der lumbosakralen Nerven während der dorsalen Korrektur von HGS sein. Dies steigert das Risiko einer Dehnung der Nerven und ist somit ein Risiko für FHP. In unserer Studie zeigte sich PI in der FHP-Gruppe signifikant größer, während SS präoperativ deutlich kleiner war, was dem Bild eines präoperativ retrovertierten Beckens mit deutlich vertikalerem Sakrum und unbalanciertem Becken entspricht (Mac-Thiong et al. 2019; Hresko et al. 2007). Lazennec konnte dieses Malalignment mit postoperativ persistierenden Schmerzen in Relation bringen (Lazennec et al. 2000). Die Imbalance des Beckens mit erhöhtem LSA (Hresko et al. 2007) ist ebenfalls ein Risikofaktor. In einer Studie von Labelle zeigte sich LSA präoperativ bei unbalanciertem Becken deutlich höher im Vgl. zur balancierten Gruppe (28° vs. 12°), postoperativ konnte jedoch eine signifikant größere Verbesserung von LSA in der unbalancierten Gruppe verzeichnet werden (Labelle et al. 2008). Hier ist das Erreichen des spino-pelvinen und sagittalen Alignments erschwert, und damit der operative Erfolg in Bezug auf das Wiedererlangen bzw. den Erhalt der sagittalen Balance und der Vermeidung einer erhöhten Komplikationsrate gefährdet. In unserer Studie konnten Vergleiche von balanciertem und unbalanciertem Becken basierend auf PT und PI nicht adressiert werden.

Das sagittale Alignment wurde bereits in diversen Studien in Bezug auf präoperative Kompensationsmechanismen, aber auch auf Veränderungen nach operativer Versorgung und oft einhergehend eingeschränkter Lebensqualität oder postoperativen Einschränkungen und Beschwerden, analysiert. In Bezug auf das spino-pelvine Alignment und die sagittale Balance gibt es zahlreiche Kompensationsmechanismen zum Erhalt der Balance (Reduktion der thorakalen Kyphose und lumbalen Lordose als Flachrücken). Bei einer HGS zeigt sich häufig eine Verschiebung der Gleichgewichtssachse mit Abnahme der lumbalen Lordose. Mit der bereits beschriebenen Retroversion des Beckens besteht häufig eine einhergehende Verkürzung der Hüftstrecker-Muskulatur. Hier lässt sich noch relativ lange die Balance halten und kompensieren, zuletzt ist eine Streckhemmung der Knie bei zu geringer Lendenlordose sichtbar (Barrey et al. 2013). Diese Verkürzung der beiden vorderen lumbopelvinen Muskeln (z. B. M. iliopsoas) sowie der dorsalen Muskulatur (z. B. Ischiokrurale Muskulatur) kann bei langfristiger Fehlstellung die Flexibilität der Lendenwirbelsäule reduzieren und eine Verkürzung der lumbopelvinen Weichteile, Bänder und Muskeln verursachen. Infolgedessen könnten sich die Muskulatur und die angrenzenden Nervenwurzeln im Rahmen der chirurgischen Reposition nicht reibungslos an den neuen korrigierten Weg anpassen. Eine Dehnung der chronisch fixierten Nervenwurzeln bei einem unbalanciertem Becken könnte – entsprechend des bereits beschriebenen Pathomechanismus – die Reizschwelle zur Entstehung eines L5-Nervenwurzel-Defizits verringern.

Mit Blick auf die Auswirkung von Weichteil- und Muskel-Funktion und die durch operative Korrektur der HGS veränderte Beckengeometrie sollte man ebenfalls einen Fokus auf die klinische Relevanz der balancierten bzw. unbalancierten Beckenposition bei HGS legen. Ein besseres, postoperatives Ergebnis des SRS-22-Scores in Bezug auf Selbstbildnis wurde bei Patienten mit balanciertem Becken beobachtet (Alzakri et al. 2019; Nahle et al. 2019; Harroud et al. 2013; Mac-Thiong et al. 2019). In unserer Analyse von 101 Patienten zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen einem verbesserten LSA sowie einer kleineren PI und besseren klinischen Ergebnissen (SF-36, ODI, VAS). Somit konnte auch in unserer Studie ein Zusammenhang zwischen Beckengeometrie und klinischem Outcome hergestellt werden. Auch Tanguay et al. sieht einen Zusammenhang einer reduzierten Lebensqualität und einer erhöhten lumbosakralen Kyphose bei HGS (Tanguay et al. 2012).

Die meisten der kürzlich veröffentlichten Studien hatten Schwierigkeiten, signifikante Unterschiede zwischen kleinen Veränderungen der spino-pelvinen Parameter sowie zwischen präoperativ und postoperativem Zustand zu erfassen (Mac-Thiong et al. 2019; Hresko et al. 2007; Alzakri et al. 2019; Faldini et al. 2014; Labelle et al. 2008) und verzeichneten Schwierigkeiten mit der Prognose der postoperativen Beckengeometrie (Alzakri et al. 2019). Hresko und Martiniani empfehlen entsprechend der Einteilung in balancierte und unbalancierte Becken bei hochgradigen Spondylolisthesen (Hresko et al. 2007) die operative Anpassung der physiologischen

spino-pelvinen Balance mit Reposition des Listhesegrades von L5 bei unbalancierten Listhesen (Hresko et al. 2009; Martiniani et al. 2012).

Insgesamt besteht eine Schwierigkeit in der Vorhersage der postoperativen Becken-Stellung zur besseren Beurteilung des klinischen Outcomes. Dies könnte in Verbindung mit der zuvor bereits beschriebenen eingeschränkten Muskelfunktion der Patienten bestehen. Die Steifigkeit der Muskulatur ist bei einigen Patienten als protektiv zu interpretieren, um eine Überdehnung der L5-Nervenwurzel zu vermeiden bzw. zu vermindern. Zukünftige biomechanische Studien könnten zu einem verbesserten Verständnis von FHP und einem Zusammenhang zur Veränderung der Beckenposition führen.

Eine gleichzeitig auftretende Skoliose konnte bei 59 % der Patienten mit HGS in der Studie von Mac-Thiong et al. festgestellt werden (Mac-Thiong et al. 2019). In unserem Patientenkollektiv zeigte sich bei 27 % der Patienten eine simultane Skoliose. Die Koinzidenz von HGS und Skoliose ist entweder unabhängig voneinander bestehend oder das Ergebnis der olisthetischen lumbosakralen Kurve. Das Vorliegen einer Skoliose könnte sich auf die Fähigkeit des Beckens, eine balancierte Position zu finden, auswirken. Im Rahmen des Wiedererlangens der postoperativen globalen Balance in der sagittalen Ebene, thorakolumbal sowie spino-pelvin, kann sich das Vorliegen einer Skoliose in der frontalen Ebene nachteilig auswirken und die Kompensationsmechanismen in der sagittalen Ebene einschränken. Dies könnte auch Differenzen bzgl. der Beobachtung einzelner Studien über den Einfluss der spino-pelvinen Balance auf das radiologische und klinische Ergebnis erklären. Weiterführende Arbeiten in der Zukunft könnten sich mit dieser Überlegung beschäftigen.

4.5 Limitationen

Unsere Studie weist wie jede retrospektive Studie Einschränkungen auf. Die Beziehung zwischen Hüfte und Wirbelsäule (spino-pelvines Alignment) konnte während des langen Untersuchungszeitraums nicht bei allen Patienten ausreichend analysiert werden, da die im Studienzeitraum angefertigten Röntgenaufnahmen am distalen Ende häufig unvollständig waren. Ähnlich ist der Gebrauch von Fragebögen zur Analyse der gesundheitsbezogenen Lebensqualität (HrQoL) eingeschränkt möglich, da nur Daten zum Follow-up der Patienten vorliegen.

Dennoch ist die Hauptbereicherung der Studie die große Anzahl der eingeschlossenen Patienten mit radiologischen und auch klinischen Daten, die in einer einzigen Klinik mittels identischen chirurgischen Techniken in einem Zeitraum über mehr als 12 Jahre operativ versorgt wurden. Das Outcome der klinischen Ergebnisse konnte durch Analyse validierter HrQoL-Fragebögen belegt werden. Ebenso lag eine detaillierte chirurgische Dokumentation über Komplikationen vor.

Dies machte eine statistische Prädiktionsanalyse für das Auftreten einer FHP möglich.

5 Schlussfolgerung

Unsere retrospektive Studie analysierte 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis, die in einem Zentrum operativ versorgt wurden. Nachdem man Vor- und Nachteile der beschriebenen chirurgischen Verfahren identifizierte, wurde versucht, Prädiktoren für ein gutes klinisches Outcome sowie Risikofaktoren für schlechtere Resultate zu definieren, um eine Basis für eine optimierte, maßgeschneiderte Therapie von HGS für einzelne Patienten zu entwickeln. Hochgradige Spondylolisthesen und Spondyloptosen sind oft einhergehend mit einer großen lumbosakralen Deformität. Diese hat eine vollständige Korrektur der HGS als Ziel und ist aufgrund des Zugs auf die Nervenwurzel ein Risikofaktor für die Entwicklung einer Fußheberparese. Die operative Reposition des Listhesegrades Meyerding <1 sowie die Reduktion von LSA und der Erhalt der lumbalen Lordose ist für das Outcome der Listhesen-Versorgung relevant. Zu vermeiden ist dabei jedoch die Überdistraktion der Nervenwurzeln bei Reposition der HGS. Außerdem zeigt sich eine spino-pelvine und sagittale Imbalance des Beckens und der Wirbelsäule als negativer prädiktiver Faktor für das Outcome der operativen Therapie einer hochgradigen Spondylolisthesis. Risikoreich ist das operative Verfahren einer Spondyloptose mit Korporektomie für sich alleine und in Bezug auf eine erhöhte Rate an Revisions-Eingriffen, aufgrund von Pseudarthrosebildung nach partieller und kompletter Korporektomie. Protektiv für Pseudarthrose und Revisions-OP ist die vollständige Reposition der Listhese.

6 Zusammenfassung

Zielsetzung:

Bisher gibt es wenige Studien mit einem großen Patientenkollektiv, welche ausschließlich hochgradige Spondylolisthesen im Bezug auf die sagittale Balance analysieren. In der vorliegenden Arbeit wurde die Frage nach prädiktiven Faktoren zur besseren präoperativen Beurteilung des Outcomes nach 360°- und 540°-Spondylodesen bei hochgradiger Spondylolisthese gestellt.

Patienten und Methoden:

Es handelt sich um eine retrospektive Auswertung einer Fallserie von 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese (Meyerding-Grad ≥ 3), welche mit einer 360°- oder 540°-Spondylodese versorgt wurden. 101 Patienten konnten in die Studie eingeschlossen werden. Das mittlere klinische und radiologische Follow-Up (FU) betrug mind. 1 Jahr. Bei 46 Patienten lagen validierte Ergebnisse sog. HrQoL-Fragebögen vor bei einem FU von mind. 2 Jahren (\emptyset 105 Monate). Es erfolgte eine Analyse von Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule in anterior-posteriorer und lateraler Projektion zu drei Untersuchungszeitpunkten (präop, postop, Follow-up) mit Messungen der globalen spino-pelvinen Balanceparameter (z.B. PI und LL), der lumbosakralen Kyphose (LSA, L4-Slope) und der vertikalen Distanz zw. L5 und S1. Diese Ergebnisse wurden bezüglich Korrekturergebnis, spino-pelvine Parameter mit Fokus auf die Auswirkung auf klinische Ergebnisse und die sagittalen Balanceparameter analysiert.

Ergebnisse:

Es wurden 101 Patienten (18 männlich, 83 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 26.4 ± 12.7 Jahren und einem Follow-up von durchschnittlich 46.7 ± 37.5 Monaten erfasst. Der Listhesegrad nach Meyerding betrug im Durchschnitt präoperativ 3.8 (L5-Translation: 81 %). Eine komplette Reposition der Spondylolisthese unter Grad 1 nach Meyerding bzw. eine L5-Translation $< 20\%$ konnte bei 55 bzw. 42 Patienten erreicht werden. Eine Reposition der L5-Translation betrug durchschnittlich $65 \pm 20\%$, die Korrektur des LSA $23^\circ \pm 13.4^\circ$ und der Anstieg der vertikalen Distanz L5-S1 wurde mit 11 ± 9 mm gemessen.

Es wurden insg. 40 Patienten mit einer 360°-Spondylodese und 61 Patienten mittels 540°-Spondylodeseverfahren versorgt. Durchschnittlich wurden 1.6 ± 0.7 Segmente instrumentiert. Bei 17 Patienten erfolgte eine partielle oder komplette L5-Korporektomie (L5-KE). Eine operative Revision war bei 31 Patienten erforderlich, in 17 Fällen aufgrund von Pseudarthrose. Major-Komplikationen wurden in 40 Fällen beobachtet. Das Risiko für eine Major-Komplikation ist erhöht bei Patienten mit präoperativ höherer lumbosakraler Deformität (LSA, $p=.04$), bei L5-KE ($p<.01$) und korreliert mit einer größeren Korrektur der Spondylolisthese. Patienten mit einer Revisions-OP hatten präoperativ eine größere Deformität (MD-Grad, L5-Translation $p<.01$), PI ($p=.02$), postoperativen L4-Slope ($p<.01$), höheres Alter ($p=.02$) und öfters

eine L5-KE ($p < .01$). Eine komplette Reposition zeigte sich protektiv für eine Pseudarthrose-Bildung ($p = .08$) und resultierte in einer besseren Korrektur von LL ($p = .03$). Es kam bei 30 Patienten postoperativ zu einer Fußheberparese, bei 29 Patienten war diese komplett oder partiell regredient zum Nachuntersuchungszeitpunkt. Veränderungen von L4-Slope ($p = .02$), LSA ($p < .01$) und der vertikalen Distanz von L5-S1 ($p = .02$) zeigten sich signifikant different zwischen Patienten der +FHP- vs. -FHP-Gruppe.

Es zeigte sich eine starke Korrelation zwischen klinischen und radiologischen Parametern im Bezug auf Lebensqualität (ODI, SF-36) und Schmerzsituation (VAS Bein/Rücken), dies insbesondere in Bezug zur Korrektur der lumbosakralen Kyphose (LSA) zum Zeitpunkt des letzten Follow-Up ($r \geq 0.4$, $p < .05$).

In der Analyse unseres Patientenkollektivs von 101 Patienten sowie der radiologischen und statistischen Auswertung konnten folgende Aspekte festgestellt werden:

Eine vollständige Reposition des Listhesegrades nach Meyerding < 1 mittels operativer Versorgung vermindert das Risiko von postoperativen Komplikationen. Einhergehend wird durch die Reposition das spino-pelvine und sagittale Alignment erhalten bzw. bei präoperativ bestehender Imbalance wiederhergestellt. Desweiteren soll die Reposition der lumbosakralen Kyphose erreicht werden. Eine Überdistraktion bei operativer Reposition ist zu vermeiden, um das Risiko von Major-Komplikationen wie z.B. einer postoperativen Fußheberparese zu reduzieren. Die komplette Reposition des Listhesegrades ist protektiv für die Remission einer postoperativen Fußheberparese.

Die präoperative lumbosakrale Kyphose und der Listhesegrad nach Meyerding stellen bei der operativen Strategie mit Ziel einer maximalen Listhesekorrektur prädiktive Risikofaktoren für die Entwicklung einer Fußheberparese dar. Desweiteren ist das Ausmaß der lumbosakralen Kyphose ein Risikofaktor für die Ausbildung einer Pseudarthrosen sowie einer nachfolgenden Revisionsoperation.

Zusammenfassung:

Multivariate Analysen konnten Risikofaktoren für die Ausbildung einer FHP, Major-Komplikation und Notwendigkeit für eine Revisionsoperation identifizieren. Mit eingeschlossen wurde der Grad der lumbosakralen Deformität (Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation) sowie die Korrektur der lumbosakralen Kyphose (LSA). Das klinische Outcome zeigte eine Korrelation mit der Korrektur von LSA.

7 Fallserien

7.1 Patient 1 – Spondylolisthese IV°

Patient, männlich, 16 Jahre, hochgradige Spondylolisthese IV° nach Meyerding

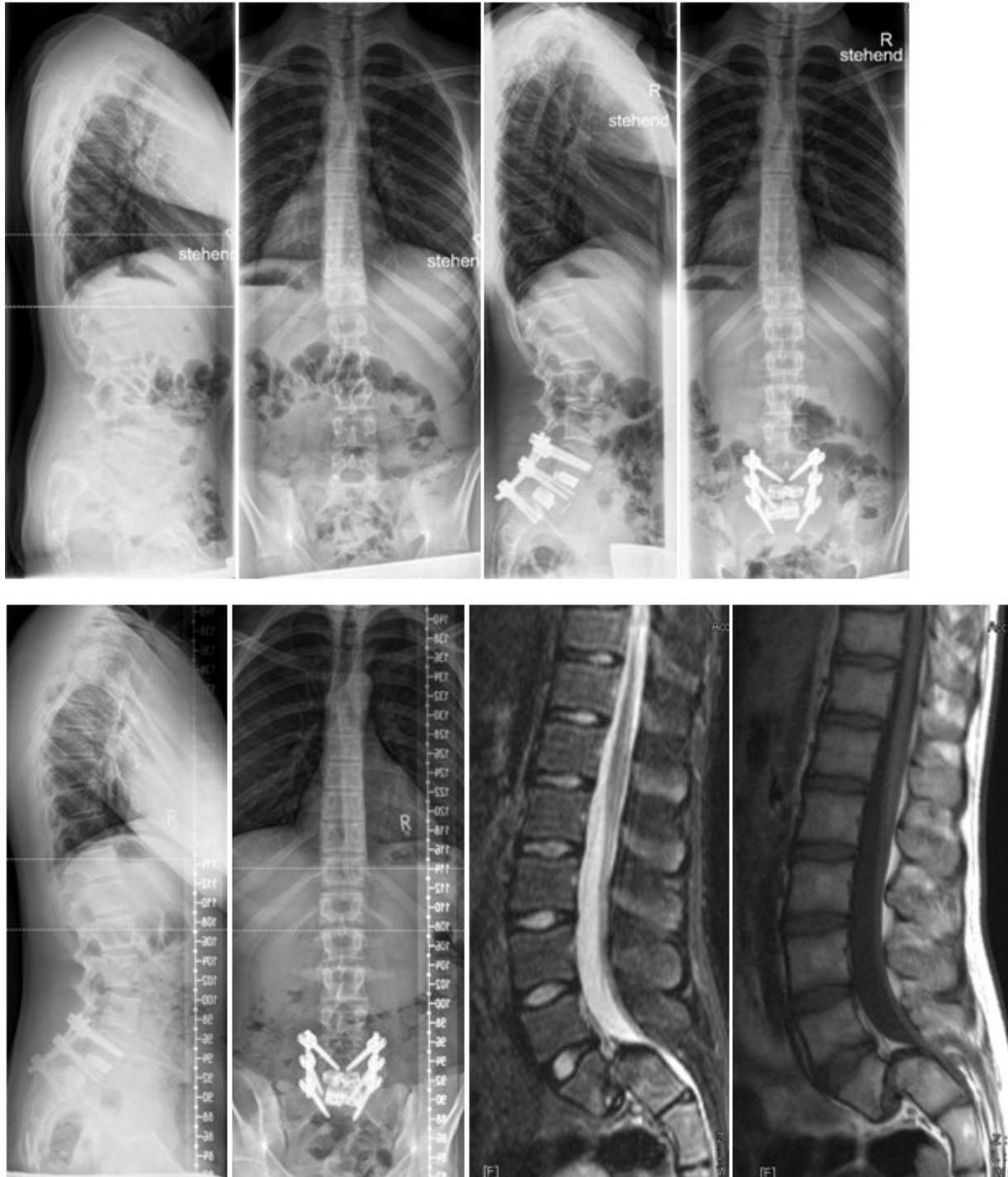


Abb. 36: von oben links nach unten rechts: Projektion lateral und a.p., präoperativ, postoperativ und FU, sowie MRT in T1 und T2 LWS lateral (eigenes Bildmaterial)

7.2 Patient 2 - Spondylolisthese III°

Patient weiblich, 26 Jahre, Spondylolisthese III° nach Meyerding

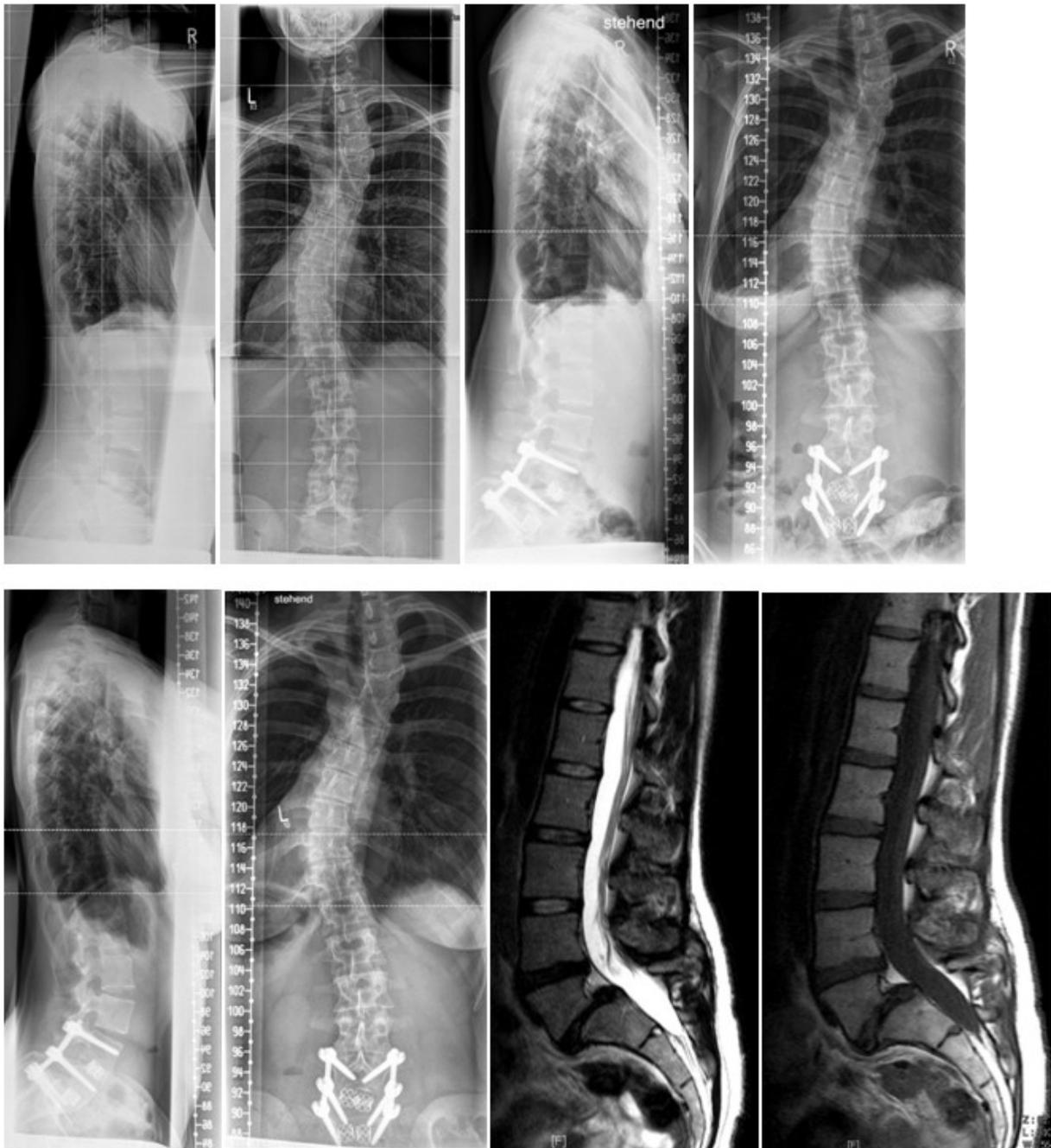


Abb. 37: von oben links nach unten rechts: Projektion lateral und a.p., präoperativ, postoperativ und FU, sowie MRT in T1 und T2 LWS lateral (eigenes Bildmaterial)

8 Anhang

8.1 Fragebogen

Lfd-#: _____

Standardfragebogen 1 von 3

- 1.) In welchem Jahr wurden Sie zuletzt bei uns an der Wirbelsäule operiert: _____.
- 2.) Nennen Sie Ihr aktuelles Alter in Jahren: _____ Jahre
- 3.) Geschlecht: männlich / weiblich
- 4.) Nennen Sie Ihren aktuellen Beruf: _____; Berentet seit: _____.
- 5.) Sind Sie Raucher: ja / nein

6.) Welche Beschwerden belasten Sie **am stärksten**? Bitte **nur ein Kästchen** ausfüllen.

- Schmerzen im Rücken
- Schmerzen im Bein/Gesäß
- Kribbeln, Taubheit oder andere Missempfindungen im Rücken, Bein, Gesäß
- keine der aufgeführten Beschwerden

7.) Bitte füllen Sie in Frage 7a und 7b das Kästchen aus, das der Intensität Ihrer Schmerzen entspricht, wobei „0“ **keine Schmerzen** und „10“ **stärkste vorstellbare Schmerzen** bedeutet. Wir bitten Sie, **zwischen Rücken- und Beinschmerzen zu unterscheiden**.

a) Wie stark waren Ihre **Rückenschmerzen** in der letzten Woche?

keine 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **stärkste** Schmerzen, die ich mir
Schmerzen vorstellen kann

b) Wie stark waren Ihre **Bein-/Gesäßschmerzen** in der letzten Woche?

keine 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **stärkste** Schmerzen, die ich mir
Schmerzen vorstellen kann

8.) Wurden Sie **seit der Operation bei uns in einem anderen Krankenhaus erneut** an der Brust- oder Lendenwirbelsäule (am Rücken) operiert?

- nein
- ja, aber an einer anderen Stelle der Wirbelsäule
- ja, an der gleichen Stelle der Wirbelsäule (gleiche Wirbelsegmente)

Standardfragebogen 2 von 3 (ODI)

Dieser Fragebogen soll uns darüber informieren, wie Ihre **Rückenprobleme** Ihre Fähigkeiten beeinflussen, den Alltag zu bewältigen. Wir bitten Sie, jeden Abschnitt zu beantworten. Kreuzen Sie in jedem Abschnitt nur die Aussage an, die Sie **heute** am besten beschreibt.

Abschnitt 1: Schmerzstärke

- Ich habe momentan keine Schmerzen.
- Die Schmerzen sind momentan sehr schwach.
- Die Schmerzen sind momentan mäßig.
- Die Schmerzen sind momentan ziemlich stark.
- Die Schmerzen sind momentan sehr stark.
- Die Schmerzen sind momentan so schlimm wie nur vorstellbar.

Abschnitt 2: Körperpflege (z. B. Waschen, Anziehen etc.)

- Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden.
- Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft.
- Meine Körperpflege durchzuführen ist schmerzhaft und ich bin langsam und vorsichtig.
- Ich brauche bei der Körperpflege etwas Hilfe, bewältige das meiste aber selbst.
- Ich brauche täglich Hilfe bei der Körperpflege.
- Ich kann mich nicht selbst anziehen, wasche mich mit Mühe und bleibe im Bett.

Abschnitt 3: Heben

- Ich kann schwere Gegenstände heben, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden.
- Ich kann schwere Gegenstände heben, aber die Schmerzen werden dadurch stärker.
- Schmerzen hindern mich daran, schwere Gegenstände vom Boden zu heben, aber es geht, wenn sie geeignet stehen (z. B. auf einem Tisch).
- Schmerzen hindern mich daran, schwere Gegenstände zu heben, aber ich kann leichte bis mittelschwere Gegenstände heben, wenn sie geeignet stehen.
- Ich kann nur sehr leichte Gegenstände heben.
- Ich kann überhaupt nichts heben oder tragen.

Abschnitt 4: Gehen

- Schmerzen hindern mich nicht daran, so weit zu gehen, wie ich möchte.
- Schmerzen hindern mich daran, mehr als 1 km zu gehen.
- Schmerzen hindern mich daran, mehr als 0.5 km zu gehen.
- Schmerzen hindern mich daran, mehr als 100 Meter zu gehen.
- Ich kann nur mit einem Stock oder Krücken gehen.
- Ich bin die meiste Zeit im Bett und muss mich zur Toilette schleppen.

Abschnitt 5: Sitzen

- Ich kann auf jedem Stuhl so lange sitzen wie ich möchte.
- Ich kann auf meinem Lieblingsstuhl so lange sitzen wie ich möchte.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine Stunde zu sitzen.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu sitzen.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als zehn Minuten zu sitzen.
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu sitzen.

Abschnitt 6: Stehen

- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden.
- Ich kann so lange stehen wie ich möchte, aber die Schmerzen werden dadurch stärker.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine Stunde zu stehen.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als eine halbe Stunde zu stehen.
- Schmerzen hindern mich daran, länger als zehn Minuten zu stehen.
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu stehen.

Abschnitt 7: Schlafen

- Mein Schlaf ist nie durch Schmerzen gestört.
- Mein Schlaf ist gelegentlich durch Schmerzen gestört.
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als sechs Stunden.
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als vier Stunden.
- Ich schlafe aufgrund von Schmerzen weniger als zwei Stunden.
- Schmerzen hindern mich daran, überhaupt zu schlafen.

Abschnitt 8: Sexualleben (falls zutreffend)

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

Abschnitt 9: Sozialleben (Aktivitäten in der Familie, im Freundeskreis oder Verein, etc.)

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

Abschnitt 10: Reisen

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

Standardfragebogen 3 von 3 (SF-36)

Ihre Gesundheit und Ihr Wohlbefinden

In diesem abschließenden Fragebogen geht es um die Beurteilung Ihres Gesundheitszustandes. Der Bogen ermöglicht es, im Zeitverlauf nachzuvollziehen, wie Sie sich fühlen und wie Sie im Alltag zurechtkommen.

Bitte kreuzen Sie für jede der folgenden Fragen das Kästchen ☒ der Antwortmöglichkeit an, die am besten auf Sie zutrifft.

1. Wie würden Sie Ihren Gesundheitszustand im Allgemeinen beschreiben?

Ausgezeichnet	Sehr gut	Gut	Weniger gut	Schlecht
▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

2. Im Vergleich zum vergangenen Jahr, wie würden Sie Ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben?

Derzeit viel besser als vor einem Jahr	Derzeit etwas besser als vor einem Jahr	Etwa so wie vor einem Jahr	Derzeit etwas schlechter als vor einem Jahr	Derzeit viel schlechter als vor einem Jahr
▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

3. Die folgenden Fragen beschreiben Tätigkeiten, die Sie vielleicht an einem normalen Tag ausüben. Sind Sie durch Ihren derzeitigen Gesundheitszustand bei diesen Tätigkeiten eingeschränkt?
Wenn ja, wie stark?

Ja, stark eingeschränkt	Ja, etwas eingeschränkt	Nein, überhaupt nicht eingeschränkt
▼	▼	▼

- a Anstrengende Tätigkeiten, z. B. schnell laufen, schwere Gegenstände heben, anstrengenden Sport treiben 1 2 3
- b Mittelschwere Tätigkeiten, z. B. einen Tisch verschieben, staubsaugen, kegeln, Golf spielen 1 2 3
- c Einkaufstaschen heben oder tragen 1 2 3
- d Mehrere Treppenabsätze steigen 1 2 3
- e Einen Treppenabsatz steigen 1 2 3
- f Sich beugen, knien, bücken 1 2 3
- g Mehr als einen Kilometer zu Fuß gehen 1 2 3
- h Mehrere hundert Meter zu Fuß gehen 1 2 3
- i Einhundert Meter zu Fuß gehen 1 2 3
- j Sich baden oder anziehen 1 2 3

4. Wie oft hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund Ihrer körperlichen Gesundheit irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder bei anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause?

Immer	Meistens	Manchmal	Selten	Nie
▼	▼	▼	▼	▼

- a Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein 1 2 3 4 5
- b Ich habe weniger geschafft als ich wollte 1 2 3 4 5
- c Ich konnte nur bestimmte Dinge tun 1 2 3 4 5
- d Ich hatte Schwierigkeiten bei der Ausführung (z. B. musste ich mich besonders anstrengen) 1 2 3 4 5

5. Wie oft hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund seelischer Probleme irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder bei anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause (z. B. weil Sie sich niedergeschlagen oder ängstlich fühlten)?

Immer	Meistens	Manchmal	Selten	Nie
▼	▼	▼	▼	▼

- a Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein 1 2 3 4 5
- b Ich habe weniger geschafft als ich wollte 1 2 3 4 5
- c Ich konnte nicht so sorgfältig wie üblich arbeiten 1 2 3 4 5

6. Wie sehr haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre normalen Kontakte zu Familienangehörigen, Freunden, Nachbarn oder zum Bekanntenkreis beeinträchtigt?

Überhaupt nicht	Etwas	Mäßig	Ziemlich	Sehr
▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

7. Wie stark waren Ihre Schmerzen in den vergangenen 4 Wochen?

Keine Schmerzen	Sehr leicht	Leicht	Mäßig	Stark	Sehr stark
▼	▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6

8. Inwieweit haben die Schmerzen Sie in den vergangenen 4 Wochen bei der Ausübung Ihrer Alltagstätigkeiten zu Hause und im Beruf behindert?

Überhaupt nicht	Etwas	Mäßig	Ziemlich	Sehr
▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

9. In diesen Fragen geht es darum, wie Sie sich fühlen und wie es Ihnen in den vergangenen 4 Wochen gegangen ist. (Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile die Zahl an, die Ihrem Befinden am ehesten entspricht)

Wie oft waren Sie in den vergangenen 4 Wochen...

	Immer	Meistens	Manchmal	Selten	Nie
	▼	▼	▼	▼	▼
a voller Leben?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
b sehr nervös?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
c so niedergeschlagen, dass nichts Sie aufheitern konnte?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
d ruhig und gelassen?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
e voller Energie?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
f entmutigt und traurig?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
g erschöpft?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
h glücklich?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
i müde?	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

10. **Wie häufig haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre Kontakte zu anderen Menschen (Besuche bei Freunden, Verwandten usw.) beeinträchtigt?**

Immer	Meistens	Manchmal	Selten	Nie
▼	▼	▼	▼	▼
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

11. **Inwieweit trifft jede der folgenden Aussagen auf Sie zu?**

	Trifft ganz zu	Trifft weitgehend zu	Weiß nicht	Trifft weitgehend nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu	
	▼	▼	▼	▼	▼	
a	Ich scheine etwas leichter als andere krank zu werden.....	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
b	Ich bin genauso gesund wie andere Menschen, die ich kenne	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
c	Ich erwarte, dass sich mein Gesundheitszustand verschlechtert.....	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
d	Mein Gesundheitszustand ist ausgezeichnet.....	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

**Sehr geehrte Patientin,
sehr geehrter Patient,**

wir bedanken uns sehr für Ihre Mitarbeit!

9 Literaturverzeichnis

Alzakri A, Labelle H, Hresko MT, Parent S, Sucato DJ, Lenke LG, Marks MC, Mac-Thiong J-M (2019) Restoration of normal pelvic balance from surgical reduction in high-grade spondylolisthesis. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 28:2087–2094. doi:10.1007/s00586-019-05973-8

AMBOSS GmbH (Hrsg) (2020) Wirbelgleiten; (Lernkarte). <https://www.amboss.com/de/library#xid=PQ0Wwf&anker=Z80ab7fc9a542a2a428b5e8ee0f9cabd9>. Zugegriffen: 11. Mai 2020

Aota Y, Yamada K, Higashi T, Ishida K, Nimura T, Saito T (2015) Accuracies in Measuring Spinopelvic Parameters in Full-Spine Lateral Standing Radiograph. *Spine* 40:640–646. doi:10.1097/BRS.0000000000000904

Barrey C, Roussouly P, Le Huec J-C, D'Acunzi G, Perrin G (2013) Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 22 Suppl 6:S834-41. doi:10.1007/s00586-013-3030-z

Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, Benaim C, Mouilleseaux B, Marty C, Prat-Pradal D, Legaye J, Duval-Beaupère G, Pélissier J (2006) Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence; Standard values and prediction of lordosis. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 15:415–422. doi:10.1007/s00586-005-0984-5

Bourassa-Moreau É, Mac-Thiong J-M, Joncas J, Parent S, Labelle H (2013) Quality of life of patients with high-grade spondylolisthesis; Minimum 2-year follow-up after surgical and nonsurgical treatments. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 13:770–774. doi:10.1016/j.spinee.2013.01.048

Colorado Comprehensive Spine Institute (Hrsg) (2016) Explaining Spinal Disorders: Degenerative Spondylolisthesis. <http://www.coloradospineinstitute.com/conditions/degenerative-spondylolisthesis/>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

Crawford CH, Larson AN, Gates M, Bess RS, Guillaume TJ, Kim HJ, Oetgen ME, Ledonio CG, Sanders J, Burton DC (2017) Current Evidence Regarding the Treatment of Pediatric Lumbar Spondylolisthesis; A Report From the Scoliosis Research Society Evidence Based Medicine Committee. *Spine Deformity* 5:284–302. doi:10.1016/j.jspd.2017.03.011

De Rug.nl (2014) Spondylolyse. <http://www.derug.nl/klachten/lendenwervels/spondylyse>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

- Decker S, Müller CW, Omar M, Krettek C, Schwab F, Trobisch PD (2016) Die sagittale Wirbelsäulenbalance--klinische Bedeutung und radiologische Bemessung. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 154:128–133. doi:10.1055/s-0041-109327
- DeWald CJ, Vartabedian JE, Rodts MF, Hammerberg KW (2005) Evaluation and Management of High-Grade Spondylolisthesis in Adults. *Spine* 30:S49-S59. doi:10.1097/01.brs.0000155573.34179.7e
- Dubousset J (1997) Treatment of Spondylolysis and Spondylolisthesis in Children and Adolescents. *Clinical orthopaedics and related research* 337:77–85. doi:10.1097/00003086-199704000-00010
- Engelhardt M, Reuter I, Freiwald J, Bohme T, Halbsguth A (1997) Spondylolyse und Spondylolisthesis und Sport. *Der Orthopäde* 26:755–759. doi:10.1007/PL00003437
- Euro Spine (Hrsg) (2008) Spine Tango COMI. https://www.eurospine.org/cm_data/SSE_lowback_COMI_D_V2.pdf. Zugegriffen: 16. Mai 2020
- Fairbank JCT, Pynsent PB (2000) The Oswestry Disability Index. *Spine* 25:2940–2953. doi:10.1097/00007632-200011150-00017
- Faldini C, Di Martino A, Perna F, Martikos K, Greggi T, Giannini S (2014) Changes in spino-pelvic alignment after surgical treatment of high-grade isthmic spondylolisthesis by a posterior approach; A report of 41 cases. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 23 Suppl 6:714–719. doi:10.1007/s00586-014-3552-z
- Fawkes CA (2012) Oswestry Disability Index (ODI). National Council for Osteopathic Research. <https://www.ncor.org.uk/wp-content/uploads/2012/12/Oswestry-Disability-questionnairev2.pdf>. Zugegriffen: 15. Mai 2020
- Fawkes CA (2013) SF-36. National Council for Osteopathic Research. <https://www.ncor.org.uk/wp-content/uploads/2013/01/SF-36.pdf>. Zugegriffen: 15. Mai 2020
- Ferraris L, Koller H, Meier O, Hempfing A (2012) Die Bedeutung der sagittalen Balance in der Wirbelsäulenchirurgie. *OUP, Orthopädische und Unfallchirurgische Praxis* 1:502–508. doi:10.3238/oup.2012.0502-0508
- Ferrero E, Ilharreborde B, Mas V, Vidal C, Simon A-L, Mazda K (2018) Radiological and functional outcomes of high-grade spondylolisthesis treated by intrasacral fixation, dome resection and circumferential fusion; A retrospective series of 20 consecutive cases with a minimum of 2 years follow-up. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 27:1940–1948. doi:10.1007/s00586-017-5455-2

Fritsch EW (2003) Spondylolisthesis. *Der Orthopäde* 32:340. doi:10.1007/s00132-003-0453-y

Fu K-MG, Smith JS, Polly DW, Perra JH, Sansur CA, Berven SH, Broadstone PA, Choma TJ, Goytan MJ, Noordeen HH, Knapp DR, Hart RA, Donaldson WF, Boachie-Adjei O, Shaffrey CI (2011) Morbidity and mortality in the surgical treatment of six hundred five pediatric patients with isthmic or dysplastic spondylolisthesis. *Spine* 36:308–312. doi:10.1097/BRS.0b013e3181cf3a1d

Gaines RW, Nichols WK (1985) Treatment of spondyloptosis by two stage L5 vertebrectomy and reduction of L4 onto S1. *Spine* 10:680–686. doi:10.1097/00007632-198509000-00015

Gaines RW (2005) L5 Vertebrectomy for the Surgical Treatment of Spondyloptosis. *Spine* 30:S66-S70. doi:10.1097/01.brs.0000155577.19606.df

Gandhoke GS, Kasliwal MK, Smith JS, Nieto J, Ibrahimi D, Park P, Lamarca F, Shaffrey C, Okonkwo DO, Kanter AS (2017) A Multicenter Evaluation of Clinical and Radiographic Outcomes Following High-grade Spondylolisthesis Reduction and Fusion. *Clin Spine Surg* 30:E363–E369. doi:10.1097/BSD.0000000000000218

Gebauer G, Pahl MA, Anderson DT, Anderson DG (2016) High-Grade Spondylolisthesis; Meyerding's grading scale is used to show the amount of slippage of the superior vertebral body on the inferior vertebral body. If slippage is greater than 100%, it is a grade 5 slippage and termed spondyloptosis. This figure demonstrates a grade 3 slippage. *Muskuloskeletal Key*. <https://muskuloskeletalkey.com/high-grade-spondylolisthesis/>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

Getty Images/Creative (2014) Spondylolisthesis (Wirbelgleiten). Wort & Bild Verlag Konradshöhe GmbH & Co. KG. <http://www.apothekenumschau.de/Spondylolisthesis#bildlupe/2/>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

Glassman SD, Hamill CL, Bridwell KH, Schwab FJ, Dimar JR, Lowe TG (2007) The impact of perioperative complications on clinical outcome in adult deformity surgery. *sp* 32:2764–2770. doi:10.1097/BRS.0b013e31815a7644

Gutman G, Labelle H, Barchi S, Roussouly P, Berthonnaud É, Mac-Thiong J-M (2016) Normal sagittal parameters of global spinal balance in children and adolescents; A prospective study of 646 asymptomatic subjects. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 25:3650–3657. doi:10.1007/s00586-016-4665-3

Harms J (2007) Spondylolisthesis (Wirbelgleiten). <http://www.harms-spinesurgery.com/src/plugin.php?m=harms.SPO01D>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

Harroud A, Labelle H, Joncas J, Mac-Thiong J-M (2013) Global sagittal alignment and health-related quality of life in lumbosacral spondylolisthesis. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European Spinal

Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 22:849–856. doi:10.1007/s00586-012-2591-6

Hresko MT, Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E (2007) Classification of High-Grade Spondylolistheses Based on Pelvic Version and Spine Balance; Possible Rationale for Reduction. *Spine* 32:2208–2213. doi:10.1097/BRS.0b013e31814b2cee

Hresko MT, Hirschfeld R, Buerk AA, Zurakowski D (2009) The effect of reduction and instrumentation of spondylolisthesis on spinopelvic sagittal alignment. *Journal of pediatric orthopedics* 29:157–162. doi:10.1097/BPO.0b013e3181977de8

Jalanko T, Helenius I, Remes V, Lamberg T, Tervahartiala P, Yrjönen T, Poussa M, Schlenzka D (2011) Operative treatment of isthmic spondylolisthesis in children; A long-term, retrospective comparative study with matched cohorts. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20:766–775. doi:10.1007/s00586-010-1591-7

Kasliwal MK, Smith JS, Shaffrey CI, Saulle D, Lenke LG, Polly DW, Ames CP, Perra JH (2012) Short-term complications associated with surgery for high-grade spondylolisthesis in adults and pediatric patients; A report from the scoliosis research society morbidity and mortality database. *Neurosurgery* 71:109–116. doi:10.1227/NEU.0b013e3182535881

Koller H, Zenner J, Ferraris L, Meier O (2009) Sagittale Balance und posttraumatische Fehlstellungen der Brust- und Lendenwirbelsäule. Teil 1. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 4:277–290. doi:10.1055/s-0029-1215083

Kunze B, Drasseck T, Kluba T (2011) Posteriore und transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (PLIF/TLIF) zur Therapie des lokalisierten Segmentaufbrauchs der LWS. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 149:312–316. doi:10.1055/s-0030-1250689

Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, Transfeldt E, O'Brien M, Chopin D, Hresko T, Dimnet J (2004) Spondylolisthesis, Pelvic Incidence, and Spinopelvic Balance. *Spine* 29:2049–2054. doi:10.1097/01.brs.0000138279.53439.cc

Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, Dimnet J, O'Brien M (2005) The Importance of Spino-Pelvic Balance in L5–S1 Developmental Spondylolisthesis. *Spine* 30:S27–S34. doi:10.1097/01.brs.0000155560.92580.90

Labelle H, Roussouly P, Chopin D, Berthonnaud E, Hresko T, O'Brien M (2008) Spino-pelvic alignment after surgical correction for developmental spondylolisthesis. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 17:1170–1176. doi:10.1007/s00586-008-0713-y

Labelle H, Mac-Thiong J-M, Roussouly P (2011) Spino-pelvic sagittal balance of spondylolisthesis; A review and classification. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society,*

and the European Section of the Cervical Spine Research Society 20 Suppl 5:641–646. doi:10.1007/s00586-011-1932-1

Lamartina C, Zavatsky JM, Petruzzi M, Specchia N (2009) Novel concepts in the evaluation and treatment of high-dysplastic spondylolisthesis. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 18 Suppl 1:133–142. doi:10.1007/s00586-009-0984-y

Lazennec J-Y, Ramaré S, Arafati N, Laudet CG, Gorin M, Roger B, Hansen S, Saillant G, Maurs L, Trabelsi R (2000) Sagittal alignment in lumbosacral fusion; Relations between radiological parameters and pain. *Eur Spine J* 9:47–55. doi:10.1007/s005860050008

Legaye J, Duval-Beaupère G, Marty C, Hecquet J (1998) Pelvic incidence; A fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *European Spine Journal* 7:99–103. doi:10.1007/s005860050038

Lehmer SM, Steffee AD, Gaines RW (1994) Treatment of L5-S1 spondyloptosis by staged L5 resection with reduction and fusion of L4 onto S1 (Gaines procedure). *Spine* 19:1916–1925. doi:10.1097/00007632-199409000-00010

Longo UG, Loppini M, Romeo G, Maffulli N, Denaro V (2014) Evidence-based surgical management of spondylolisthesis; Reduction or arthrodesis in situ. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 96:53–58. doi:10.2106/JBJS.L.01012

Lundine KM, Lewis SJ, Al-Aubaidi Z, Alman B, Howard AW (2014) Patient outcomes in the operative and nonoperative management of high-grade spondylolisthesis in children. *J Pediatr Orthop* 34:483–489. doi:10.1097/BPO.000000000000133

Mac-Thiong J-M, Labelle H (2006) A proposal for a surgical classification of pediatric lumbosacral spondylolisthesis based on current literature. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 15:1425–1435. doi:10.1007/s00586-006-0101-4

Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimar JR, Betz RR, Labelle H (2004) Sagittal Alignment of the Spine and Pelvis During Growth. *Spine* 29:1642–1647. doi:10.1097/01.BRS.0000132312.78469.7B

Mac-Thiong J-M, Labelle H, Berthonnaud E, Betz RR, Roussouly P (2007) Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 16:227–234. doi:10.1007/s00586-005-0013-8

Mac-Thiong J-M, Wang Z, Guise JA de, Labelle H (2008a) Postural model of sagittal spino-pelvic alignment and its relevance for lumbosacral developmental spondylolisthesis. *Spine* 33:2316–2325. doi:10.1097/BRS.0b013e318186b236

Mac-Thiong J-M, Labelle H, Parent S, Hresko MT, Deviren V, Weidenbaum M (2008b) Reliability and development of a new classification of lumbosacral spondylolisthesis. *Scoliosis* 3:19. doi:10.1186/1748-7161-3-19

Mac-Thiong J-M, Roussouly P, Berthonnaud E, Guigui P (2011a) Age- and sex-related variations in sagittal sacropelvic morphology and balance in asymptomatic adults. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5:572–577. doi:10.1007/s00586-011-1923-2

Mac-Thiong J-M, Labelle H, Roussouly P (2011b) Pediatric sagittal alignment. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 20 Suppl 5:586–590. doi:10.1007/s00586-011-1925-0

Mac-Thiong J-M, Hresko MT, Alzakri A, Parent S, Sucato DJ, Lenke LG, Marks M, Labelle H (2019) Criteria for surgical reduction in high-grade lumbosacral spondylolisthesis based on quality of life measures. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 28:2060–2069. doi:10.1007/s00586-019-05954-x

Mannion AF, Junge A, Fairbank JCT, Dvorak J, Grob D (2006a) Development of a German version of the Oswestry Disability Index. Part 1: cross-cultural adaptation, reliability, and validity. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 15:55–65. doi:10.1007/s00586-004-0815-0

Mannion AF, Junge A, Grob D, Dvorak J, Fairbank JCT (2006b) Development of a German version of the Oswestry Disability Index. Part 2: sensitivity to change after spinal surgery. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 15:66–73. doi:10.1007/s00586-004-0816-z

Mannion AF, Porchet F, Kleinstuck FS, Lattig F, Jeszenszky D, Bartanusz V, Dvorak J, Grob D (2009a) The quality of spine surgery from the patient's perspective. Part 1: the Core Outcome Measures Index in clinical practice. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 18 Suppl 3:367–373. doi:10.1007/s00586-009-0942-8

Mannion AF, Porchet F, Kleinstuck FS, Lattig F, Jeszenszky D, Bartanusz V, Dvorak J, Grob D (2009b) The quality of spine surgery from the patient's perspective: part 2. Minimal clinically important difference for improvement and deterioration as measured with the Core Outcome Measures Index. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 18 Suppl 3:374–379. doi:10.1007/s00586-009-0931-y

Mannion AF, Fekete TF, Wertli MM, Mattle M, Nauer S, Kleinstück FS, Jeszenszky D, Haschtmann D, Becker H-J, Porchet F (2015) Could less be more when assessing patient-rated outcome in spinal stenosis? *Spine* 40:710–718. doi:10.1097/BRS.0000000000000751

Mannion AF, Vila-Casademunt A, Domingo-Sàbat M, Wunderlin S, Pellisé F, Bago J, Acaroglu E, Alanay A, Pérez-Grueso FS, Obeid I, Kleinstück FS (2016) The Core Outcome Measures Index (COMI) is a responsive instrument for assessing the outcome of treatment for adult spinal deformity. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 25:2638–2648. doi:10.1007/s00586-015-4292-4

Martikos K, Greggi T, Faldini C (2019) High grade isthmic spondylolisthesis; can reduction always re-align the unbalanced pelvis? *BMC musculoskeletal disorders* 20:499. doi:10.1186/s12891-019-2865-9

Martiniani M, Lamartina C, Specchia N (2012) "In situ" fusion or reduction in high-grade high dysplastic developmental spondylolisthesis (HDSS). *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 21 Suppl 1:S134-40. doi:10.1007/s00586-012-2230-2

McHorney CA, Ware JE, Raczek AE (1993) The MOS 36-Item Short-Form Health Survey (SF-36); II. Psychometric and clinical tests of validity in measuring physical and mental health constructs. *Medical Care* 31:247–263. doi:10.1097/00005650-199303000-00006

Meier O, Koller H, Ferraris L, Völpel J, Hempfing A (2010) Die Therapie der hochgradigen Spondylolisthese und Spondyloptose. *up2date Orthopädie und Unfallchirurgie* 5:387–402. doi:10.1055/s-0030-1256047

MEYERDING HW (1931) Spondylolisthesis. *Journal of bone and joint surgery* 13:39–48

Min K (2015) Spondylodese; Versteifung und Stabilisation der Wirbelsäule. *Swiss Scoliosis - Zentrum für Chirurgie der Wirbelsäule und Skoliose*. http://swiss-scoliosis.ch/media/Spondylodese_DE.pdf. Zugegriffen: 15. Mai 2020

Mohriak R, Vargas Silva PD, Trandafilov M, Martins DE, Wajchenberg M, Cohen M, Puertas EB (2010) Spondylolysis and Spondylolisthesis in young Gymnasts. *Revista Brasileira de Ortopedia (English Edition)* 45:79–83. doi:10.1016/S2255-4971(15)30221-4

Molinari MRW, Bridwell KH, Lenke LG, Ungacta FF, Riew KD (1999) Complications in the Surgical Treatment of Pediatric High-Grade, Isthmic Dysplastic Spondylolisthesis. *Spine* 24:1701. doi:10.1097/00007632-199908150-00012

- Molinari RW, Bridwell KH, Lenke LG, Baldus C (2002) Anterior Column Support in Surgery for High-Grade, Isthmic Spondylolisthesis. *Clinical orthopaedics and related research* 394:109–120. doi:10.1097/00003086-200201000-00013
- Moreau S, Lonjon G, Guigui P, Lenoir T, Garreau de Loubresse C, Chopin D (2016) Reduction and fusion in high-grade L5-S1 spondylolisthesis by a single posterior approach. Results in 50 patients. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR* 102:233–237. doi:10.1016/j.otsr.2015.12.016
- Morfeld M, Bullinger M, Nantke J, Brähler E (2005) Die Version 2.0 des SF-36 Health Survey -- Ergebnisse einer bevölkerungsrepräsentativen Studie. *Sozial- und Präventivmedizin* 50:292–300. doi:10.1007/s00038-005-4090-6
- Morfeld M, Stritter W, Bullinger M (2012) Der SF-36 Health Survey. In: Schöffski O, Graf von der Schulenburg, J.-Matthias (Hrsg) *Gesundheitsökonomische Evaluationen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S 393–410
- Nahle IS, Labelle H, Parent S, Joncas J, Mac-Thiong J-M (2019) The impact of surgical reduction of high-grade lumbosacral spondylolisthesis on proximal femoral angle and quality of life. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 19:670–676. doi:10.1016/j.spinee.2018.10.001
- Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P (Hrsg) (2009) *Orthopädie und Unfallchirurgie, Duale Reihe*. Thieme, Stuttgart
- Obeid I, Laouissat F, Bourghli A, Boissière L, Vital J-M (2016) One-stage posterior spinal shortening by L5 partial spondylectomy for spondyloptosis or L5-S1 high-grade spondylolisthesis management. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 25:664–670. doi:10.1007/s00586-015-4174-9
- Omidi-Kashani F, Hootkani A, Jarahi L, Rezvan M, Moayedpour A (2015) Radiologic and clinical outcomes of surgery in high grade spondylolisthesis treated with temporary distraction rod. *Clinics in orthopedic surgery* 7:85–90. doi:10.4055/cios.2015.7.1.85
- Pawar A, Labelle H, Mac-Thiong J-M (2012) The evaluation of lumbosacral dysplasia in young patients with lumbosacral spondylolisthesis; Comparison with controls and relationship with the severity of slip. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 21:2122–2127. doi:10.1007/s00586-012-2181-7
- Petraco DM, Spivak JM, Cappadona JG, Kummer FJ, Neuwirth MG (1996) An anatomic evaluation of L5 nerve stretch in spondylolisthesis reduction. *Spine* 21:1133-8; discussion 1139. doi:10.1097/00007632-199605150-00002

- Pingel A, Franke J, Kandziora F (2018) Sagittale Balance und posttraumatische Kyphose. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 13:143–159. doi:10.1055/s-0043-117524
- Rand Health Care (Hrsg) 36-Item Short Form Survey (SF-36) Scoring Instructions. https://www.rand.org/health-care/surveys_tools/mos/36-item-short-form/scoring.html. Zugegriffen: 15. Mai 2020
- Rauschmann M, Winking M, Arand M, Stücker R (2017) *Wirbelsäule interdisziplinär; Operative und konservative Therapie*. Schattauer, Stuttgart
- Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J (2005) Classification of the Normal Variation in the Sagittal Alignment of the Human Lumbar Spine and Pelvis in the Standing Position. *Spine* 30:346–353. doi:10.1097/01.brs.0000152379.54463.65
- Ruf M, Melcher R, Merk H, Harms J (2006) Anatomische Reposition und monosegmentale Fusion bei hochgradiger dysplastischer Spondylolisthese L5/S1. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 144:33–39. doi:10.1055/s-2005-918189
- Sailhan F, Gollogly S, Roussouly P (2006) The radiographic results and neurologic complications of instrumented reduction and fusion of high-grade spondylolisthesis without decompression of the neural elements; A retrospective review of 44 patients. *Spine* 31:161–169. doi:10.1097/01.brs.0000194780.17528.6b
- Schär RT, Sutter M, Mannion AF, Eggspühler A, Jeszenszky D, Fekete TF, Kleinstück F, Haschtmann D (2017) Outcome of L5 radiculopathy after reduction and instrumented transforaminal lumbar interbody fusion of high-grade L5-S1 isthmic spondylolisthesis and the role of intraoperative neurophysiological monitoring. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 26:679–690. doi:10.1007/s00586-017-4964-3
- Scheyerer MJ, Werner CML (2013) *Chirurgie von Wirbelkörperfrakturen*. *Swiss Medical Forum* 13:881-885
- Schlenzka D (1997) Die Spondylolisthesis im Kindes- und Jugendalter. *Orthopäde* 26:760–768. doi:10.1007/s001320050153
- Seller K, Wild A (2005) Spondylolyse, Spondylolisthese, Spondyloptose. *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete* 143:R101-23. doi:10.1055/s-2005-873022
- Sevrain A, Aubin C-E, Gharbi H, Wang X, Labelle H (2012) Biomechanical evaluation of predictive parameters of progression in adolescent isthmic spondylolisthesis; A computer modeling and simulation study. *Scoliosis* 7:2. doi:10.1186/1748-7161-7-2
- Szeifert K-H (2015) Spondylolisthese (Wirbelgleiten); Wenn der Rücken zur Sprungschance wird. *MTA-R.de*. <https://www.mta-r.de/blog/fallbeispiel-spondylolisthese-wirbelgleiten-wenn-der-ruecken-zur-sprungschance-wird/>. Zugegriffen: 15. Mai 2020

- Taillard W (1959) Die Spondylolisthesen. In: Prof.Dr.med. Herbert Junghanns (Hrsg) Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis. Hippokrates-Verlag, Stuttgart, S 14–19
- Tanguay F, Labelle H, Wang Z, Joncas J, Guise JA de, Mac-Thiong J-M (2012) Clinical significance of lumbosacral kyphosis in adolescent spondylolisthesis. *Spine* 37:304–308. doi:10.1097/BRS.0b013e31821cc558
- Tilan J, Andras LM, Krieger MD, Skaggs DL (2017) Return of motor evoked potentials after knee flexion in the setting of high-grade spondylolisthesis. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* 26:619–622. doi:10.1007/s00586-016-4853-1
- Toueg C-W, Mac-Thiong J-M, Grimard G, Poitras B, Parent S, Labelle H (2015) Spondylolisthesis, Sacro-Pelvic Morphology, and Orientation in Young Gymnasts. *Journal of spinal disorders & techniques* 28:E358-64. doi:10.1097/BSD.0b013e3182956d62
- Tyrakowski M, Siemionow K, Yu H (2015) Pelvic incidence and pelvic tilt measurement using femoral heads or acetabular domes to identify centers of the hips: comparison of two methods. *European Spine Journal* 24:1259–1264. doi:10.1007/s00586-014-3739-3
- Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J (2002) Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J*:80–87. doi:10.1007/s005860000224
- Wang W, Aubin C-E, Cahill P, Baran G, Arnoux P-J, Parent S, Labelle H (2016) Biomechanics of high-grade spondylolisthesis with and without reduction. *Medical & biological engineering & computing* 54:619–628. doi:10.1007/s11517-015-1353-0
- Ware JE, Sherbourne CD (1992) The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Medical Care* 30:473–483
- Wiltse LL (1975) Spondylolisthesis. *The Western Journal of Medicine* 122:152–153
- Wiltse LL, Newman PH, Macnab I (1976) Classification of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clinical Orthopaedics & Related Research* June:23–29
- Xue X, Wei X, Li L (2016) Surgical Versus Nonsurgical Treatment for High-Grade Spondylolisthesis in Children and Adolescents; A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine* 95:e3070. doi:10.1097/MD.0000000000003070
- Yue W-M, Brodner W, Gaines RW (2005) Abnormal Spinal Anatomy in 27 Cases of Surgically Corrected Spondyloptosis. *Spine* 30:S22-S26. doi:10.1097/01.brs.0000155572.72287.92

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikation Spondylolisthesis, modifiziert nach Wiltse (Wiltse 1975) und Newman (Wiltse et al. 1976).....	4
Tab. 2: Spondylolisthesen-Klassifikation basierend auf dem spino-pelvinen Alignment nach Spinal Deformity Study Group (Mac-Thiong et al. 2008a; Labelle et al. 2011)..	6
Tab. 3: Radiologische und klinische Ergebnisse von 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis. ODI = Oswestry Disability Index, SF-36 PSC = SF-36 score physical function component, VAS = Visual analog scale, * PI von N = 72 valide Patienten	41
Tab. 4: Analyse der Subgruppe Revision JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten mit der Bedürftigkeit einer Revisions-OP bzw. ohne Revisions-OP. Abkürzungen siehe Methoden.....	52
Tab. 5: Analyse der Subgruppe Komplikation JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten mit und ohne Komplikationen (+/- COMPL). Abkürzungen siehe Methoden.....	54
Tab. 6: Analyse der Subgruppe Fußheberparese JA versus NEIN: Die Subgruppen-Analyse vergleicht Patienten bzgl. Auftreten von postoperativer Fußheberparese (+/- FHP). Abkürzungen siehe Methoden.....	57

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spondylolisthesis: Wirbelkörper eingefärbt, Wirbelkörper L5 gleitet nach ventral ab (Getty Images/Creative 2014).....	1
Abb. 2: Entwicklung einer Spondylolisthesis über die Spondylyse in der Pars Interarticularis eines Wirbelkörpers (De Rug.nl 2014).	1
Abb. 3: Spondylyse: links - einseitig, rechts - beidseits: Pars Interarticularis durchbrochen durch lytischen Prozess (Harms 2007).	3
Abb. 4: Skizze Spondylolisthese Grad-Einteilung nach Meyerding (Colorado Comprehensive Spine Institute 2016).....	3
Abb. 5: Skizze Spondylolisthesis Grad-Einteilung nach Meyerding in lateraler und axialer Ansicht des Sakrums (Gebauer et al. 2016).	4
Abb. 6: Klassifikation der Spondylolisthesis nach Mac-Thiong et al. (Mac-Thiong et al. 2008a).....	5
Abb. 7: Morphologische Merkmale einer Spondylolisthesis: links - Seitliche Aufnahme, domförmiges Sakrum und trapezoider Lendenwirbelkörper L5 bei Spondylolisthesis Grad 4 nach Meyerding; rechts - a.p.-Aufnahme, "umgekehrter Napoleonhut": L5 wird vor das Sakrum projiziert durch das Abgleiten des Wirbelkörpers (eigenes Bildmaterial).....	8
Abb. 8: Spondylysis als "Hundehalsband" in der lat. Projektion einer konventionellen Röntgenaufnahme (Szeifert 2015).....	9
Abb. 9: Beispielbild einer Myelographie (MRT in T2) (eigenes Bildmaterial).....	9
Abb. 10: Röntgenbilder in Inklination und Reklination (eigenes Bildmaterial)	10
Abb. 11: links: Pedikelschrauben, Mitte/rechts: Beispiele für lumbale Spondylodese mit Cage von lateral und dorsal projiziert (eigenes Bildmaterial).....	12
Abb. 12: Skizze Spondylodese: Fixateur intern von L4 auf S1 mit Pedikelschrauben und axialen Stäben, sowie Cage-Implantation (Min 2015).	12
Abb. 13: Gaines-Verfahren (1985) mit L5-Korporektomie (Stufe 1 von ventral) und Reposition mit Spondylodese von L4 auf S1 (Stufe 2 von dorsal) (Lehmer et al. 1994; Gaines 2005).	14
Abb. 14: Präoperative und postoperative Röntgen-Aufnahmen einer Patientin mit Korporektomie und Cage-Ersatz (eigenes Bildmaterial).....	14
Abb. 15: Darstellung von Dubousset: 'Cone of Economy', welches das Becken und die Wirbelsäule als Tetraeder darstellt und hiermit die ergonomische Stellung des Körpers in der Balance im Raum verdeutlicht in verschiedenen Positionen. (Koller et al. 2009, S.282)	17
Abb. 16: Präoperative Bild-Serie der Wirbelsäule eines 16-jährigen männlichen Patienten mit hochgradiger Spondylolisthesis IV° nach Meyerding: links - anterior-	

posteriorer Strahlengang; rechts - sagittaler / lateraler Strahlengang (eigenes Bildmaterial).....	18
Abb. 17: Darstellung des Beckens bei hochgradiger Spondylolisthese: Links - balanciert bei Becken in Anteversion, rechts - unbalanciert bei Becken in Retroversion. (Hresko et al. 2007, S. 2212, Copyright 2007 Medtronic Sofamor Danek USA, Inc).....	22
Abb. 18: Wirbelsäulen-Typen nach Roussouly (Scheyerer und Werner 2013)	23
Abb. 19: Skizze Messung LWS in lateralem Strahlengang, Abkürzungen siehe Kap. 2.3.1, eigenes Bildmaterial	28
Abb. 20: Skizze Klassifikation Listhesegrad nach Meyerding (AMBOSS GmbH 2020).	29
Abb. 21: Skizze Messung Wirbelsäule im lateralen Strahlengang, Abkürzungen siehe Kap. 2.3.2 eigenes Bildmaterial	31
Abb. 22: Skizze Messung Wirbelsäule in anterior-posteriorem Strahlengang, Abkürzungen siehe Methodenteil Kap. 2.3.3, eigenes Bildmaterial	33
Abb. 23: Geschlechterverteilung der in der Studie inkludierten Patienten	38
Abb. 24: Altersverteilung der 101 in der Studie inkludierten Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese	38
Abb. 25: Verteilung von 101 Patienten nach Listhesegrad nach Meyerding	39
Abb. 26: Messungen von Listhesegrad nach Meyerding und L5-Translation (%) zum Zeitpunkt präop, postop und FU (Mittelwert \pm 1 Standardabweichung als Vertical-Bar)	40
Abb. 27: Wolkendiagramm zur Korrelation von PI (FU) zu SF-36-PCS und ODI (%): statistische Korrelation von PI zu klinischen Ergebnissen (SF-36-PCS und ODI (%)) zum Zeitpunkt des Follow-Up. Die rote Linie kennzeichnet die Regressionslinie als Mittelwert mit einem 95 %-Konfidenzintervall (gepunktete Linie).....	43
Abb. 28: Signifikante Korrelation zwischen Variablen der lumbosakralen Deformität (LSA, L4-Slope) und des spinalen Alignments (SVA, LL, TK)	44
Abb. 29: Veränderung der radiologischen Parameter nach OP für 101 Patienten mit hochgradiger Spondylolisthese über den gesamten Untersuchungszeitraum (präop, postop, FU): Jeder Graph zeigt den ungewichteten Mittelwert, Vertical Bars kennzeichnen das 95 %-Konfidenzintervall für die Variablen gemessen präoperativ, postoperativ und beim letzten Follow-Up.....	46
Abb. 30: Statistische Korrelation von LSA (FU) und klinischen Ergebnissen (ODI (%) und SF-36-PCS): Die rote Linie kennzeichnet die Regressionsgerade mit dem 95 %-Konfidenzintervall (gepunktete Linie) für die Mittelwerte (MEANS).	48
Abb. 31: Darstellung des obersten (links) und untersten (rechts) instrumentierten Wirbelkörper	50

Abb. 32: Anzahl der aufgetretenen Komplikationen	53
Abb. 33: Häufigkeit der Fußheberparese	55
Abb. 34: Statistisch starke Korrelation zwischen klinischen Ergebnissen in Bezug auf Lebensqualität und Schmerzsituation.....	59
Abb. 35: Verschiedene Fallbeispiele von Patienten mit HGS verschiedener Schweregrade (je ein Röntgenbild-Paar mit präoperativem und postoperativem Zustand pro Patient) (eigenes Bildmaterial).....	61
Abb. 36: von oben links nach unten rechts: Projektion lateral und a.p., präoperativ, postoperativ und FU, sowie MRT in T1 und T2 LWS lateral (eigenes Bildmaterial) .	78
Abb. 37: von oben links nach unten rechts: Projektion lateral und a.p., präoperativ, postoperativ und FU, sowie MRT in T1 und T2 LWS lateral (eigenes Bildmaterial) .	79

12 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die bei der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

„Etablierung prädiktiver Faktoren für sagittale spino-pelvine Balance und optimierte Ergebnisse in der operativen Behandlung hochgradiger Spondylolisthesen und Spondyloptosen“

in der Klinik für Neurochirurgie, Klinikum Bogenhausen, München unter Anleitung und Betreuung des ehemaligen Direktors Prof. Dr. med. Ch. B. Lumenta sowie Prof. Dr. med. H. Koller (ehemals Werner-Wicker-Klinik, Bad Wildungen, jetzt Klinik für Neurochirurgie, Rechts der Isar) ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Ab. 6 und 7 Satz 2 angebotenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht, oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben und bin nicht in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Die öffentlich zugängliche Promotionsordnung der TUM ist mir bekannt, insbesondere habe ich die Bedeutung von § 28 (Nichtigkeit der Promotion) und § 29 (Entzug des Doktorgrades) zur Kenntnis genommen. Ich bin mir der Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung bewusst.

Marktschellenberg, den _____

13 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Ch. B. Lumenta danke ich für die Übernahme meiner Doktorvaterschaft an der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Heiko Koller für die Hilfsbereitschaft und Geduld, die er mir entgegenbrachte. Die persönliche Betreuung und Unterstützung während der Durchführung und Auswertung dieser Studie waren eine große Hilfe.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn MMag. Wolfgang Hitzl von der Paracelsus Universität Salzburg in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. med. H. Koller für die statistische Analyse meiner Fragestellung bedanken. Nur mit seiner Unterstützung war es möglich, spezifische Risikofaktoren und Prädiktoren herauszuarbeiten.

Ein großer Dank geht an das gesamte Ärzte-Team des Zentrums für Wirbelsäulenchirurgie der Werner-Wicker-Klinik unter der Leitung von Chefarzt Dr. med. Oliver Meier. Ich wurde in das Team herzlich aufgenommen und fand in Gesprächen mit Kollegen viele Antworten auf meine Fragen im Bereich der Wirbelsäulenchirurgie.

Außerdem möchte ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, meinem Partner und meiner Schwester danken, die mich während des Studiums und der intensiven Zeit meiner Doktorarbeit unterstützt und motiviert haben.