

Diplomarbeit

Repositionsergebnisse und Korrekturverluste nach perkutaner minimalinvasiver Versorgung der vorderen und hinteren Säule bei A3 und A4 Frakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule

eingereicht von

Marco Hackl

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde
(Dr. med. univ.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie

unter der Anleitung von

Priv.-Doz. Dr. med. univ. Paul Puchwein

Dr. med. univ. Thomas Poglitsch

Graz, am 29.03.2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 29.03.2017

Marco Hackl eh.

Danksagungen

An dieser Stelle gilt mein Dank all jenen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich zuerst bei meinen beiden Betreuern Herrn Priv.-Doz. Dr. med. univ. Paul Puchwein und Herrn Dr. med. univ. Thomas Poglitsch für die Bereitstellung dieses sehr interessanten Themas und die exzellente und gewissenhafte Betreuung herzlich bedanken. Ein weiteres Dankeschön gebührt Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. et scient. med. Patrick Sadoghi für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Von ganzen Herzen möchte ich mich bei meinen Eltern, Erwin und Claudia Hackl, sowie bei meiner gesamten Familie recht herzlich bedanken. Danke für Euer Vertrauen und Euren Glauben an mich. Durch Eure Unterstützung wurde mir das Studium erst ermöglicht. Ebenso will ich meinen Freunden danken, die mich während des Studiums begleitet und unterstützt haben.

Zusammenfassung

Thorakolumbale Berstungsfrakturen ohne neurologischer Ausfallsymptomatik stellen die Unfallchirurgie vor großen Herausforderungen und folgen national und international keinem einheitlichen Behandlungsprinzip. Da durch die traditionell verwendete dorsale Stabilisierung die vordere Säule des Wirbelkörpers nicht suffizient aufgerichtet werden kann, ist entweder mit einem zum Teil erheblichen Korrekturverlust zu rechnen oder eine zusätzliche komplikationsbehaftete Operation über einen ventralen Zugang nötig. Mit der Einführung der Kyphoplastie ist es nun über den dorsalen Zugangsweg möglich, den Wirbelkörper auch im vorderen Bereich aufzurichten, kann aber bei alleiniger Verwendung wiederum die Hinterkante des Wirbelkörpers nicht ausreichend stabilisieren. Das neueste operative Verfahren zur traumatischen Frakturbehandlung stellt die minimalinvasive Kombination aus Kyphoplastie und perkutaner dorsaler Stabilisierung dar und ermöglicht über den dorsalen Zugangsweg die Aufrichtung beider Säulen. Ziel der Arbeit war es, die klinischen und radiologischen Ergebnisse dieser Operationsmethode zu evaluieren.

Material und Methoden: Insgesamt wurden 29 PatientInnen mit monosegmentalen traumatischen A3 und A4 Frakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule, die mit monoaxialen Schrauben instrumentiert wurden, in die Studie einbezogen. Zur radiologischen Beurteilung des Repositionsergebnisses und des Korrekturverlustes wurde präoperativ, postoperativ, vor und mindestens 6 Monate nach Explantation des Fixateur interne die Wirbelkörperhöhe an der Vorderkante, im Zentrum und an der Hinterkante, sowie der bisegmentale Kyphosewinkel nach Cobb vermessen. Im Rahmen der Abschlussuntersuchung wurde das funktionelle Outcome durch den Oswestry Disability Index und der segmentalen Schmerzdiagnostik evaluiert.

Ergebnisse: Der durchschnittliche Repositionsverlust nach Metallentfernung betrug 6,15 % an der Vorderkante, 1 % an der Hinterkante und 5,35 % im Zentrum des Wirbelkörpers. Es wurde kein signifikanter weiterer Höhenverlust nach Metallentfernung beobachtet. Der bisegmentale Kyphosewinkel nahm seit der Frakturaufrichtung im Mittel um 5,86 Grad zu. Der durchschnittliche ODI Wert lag bei 19,86 % und 58,6 % der PatientInnen hatten keine lokalen Beschwerden im ehemaligen Operationsgebiet. Asymptomatische Zementaustritte traten bei 3

PatientInnen auf, eine frühzeitige Metallentfernung aufgrund Schraubenlockerung musste bei zwei PatientInnen durchgeführt werden.

Schlussfolgerung: Die Ballonkyphoplastie zeigt in Verbindung mit der perkutanen dorsalen Stabilisierung gute Ergebnisse mit wenigen Komplikationen und stellt eine ernstzunehmende Alternative zu offenen Verfahren dar.

Abstract

Surgical interventions for thoracolumbar burst fractures without neurological deficit present a major challenge for trauma surgery and do not have a consistent treatment algorithm. Since the anterior column of the vertebral body cannot be reduced due to the traditional dorsal stabilization, either a considerable loss of correction can be expected or an additional complication-related operation is necessary via a ventral approach. With the introduction of kyphoplasty it is now possible to correct the vertebral body also in the anterior column, but when used alone it cannot sufficiently stabilize the posterior column.

The most recent operative procedure for traumatic fracture treatment is the minimally invasive combination of kyphoplasty and percutaneous pedicle screw fixation and allows the reduction of both columns via the dorsal approach. The aim of the study was to evaluate the clinical and radiological results of this method.

Materials and Methods: A total of 29 patients with traumatic monosegmental A3 and A4 fractures of the thoracic and lumbar spine were included in the study. Patients were treated with kyphoplasty and monoaxial dorsal instrumentation. For the radiological assessment, the vertebral body height at the front edge, in the center and at the posterior edge, as well as the bisegmental kyphosis angle, were measured preoperatively, postoperatively, before and at a minimum of six months after removal of the internal fixator. In the final examination, the functional outcome was evaluated by the Oswestry Disability Index (ODI) and the segmental pain diagnosis.

Results: The average loss of correction after hardware removal was 6.15 % at the front edge, 1 % at the dorsal edge, and 5.35 % at the center of the vertebral body. No significant further loss of height after removal was observed. The bisegmental kyphosis angle increased on average by 5.86 degrees since first operation. The average ODI score was 19.86 % and 58.6 % of the patients had no local complaints in the former operative area. Asymptomatic cement exudations occurred in 3 patients, an early removal of the internal fixator due to screw loosening had to be carried out in two patients.

Conclusion: Percutaneous pedicle screw fixation plus kyphoplasty leads to good results with few complications and is a serious alternative to open procedures.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	ii
Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vi
Glossar und Abkürzungen	viii
1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Ziel der Arbeit	1
1.2 Die Wirbelsäule	2
1.2.1 Anatomie	2
1.2.2 Bewegungsumfang der Wirbelsäule	12
1.3 Wirbelkörperfrakturen	14
1.3.1 Definition und Mechanismen einer Fraktur	14
1.3.2 Allgemeine Informationen	14
1.3.3 Epidemiologie	15
1.3.4 Klassifikationssysteme traumatischer Frakturen im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule	17
1.3.4.1 Historische Entwicklung	17
1.3.4.2 AOSpine Klassifikation	22
1.3.5 Diagnostik thorakolumbalen Verletzungen	27
1.4 Therapie	31
1.4.1 Konservative Therapie	32
1.4.2 Operative Therapie	34
1.4.2.1 Minimalinvasive Zementaugmentationstechniken	36
1.4.2.2 Minimalinvasive dorsale Stabilisierung	37
1.5 Knochenersatzwerkstoffe	46
1.5.1 Knochenzemente	47
1.5.1.1 Polymethylmethacrylatzement (PMMA)	48
1.5.1.2 Calciumphosphatzement (CaPh)	50
2. Patienten und Methoden	52
2.1 Studiendesign	52
2.2 PatientInnen	52
2.3 Ein- und Ausschlusskriterien	53
2.4 Nachuntersuchungen	55
2.5 Körperliche Beeinträchtigung: Oswestry Disability Index	56
2.6 Segmentale Schmerzdiagnostik	57

2.7	Radiologische Auswertung	58
3.	Ergebnisse	60
3.1	Unfallmechanismus	60
3.2	Frakturlokalisierung und Klassifikation	61
3.3	Wahl des Knochenzements zur Wirbelkörperaugmentation	62
3.4	Oswestry Disability Index (ODI)	63
3.5	Segmentale Schmerzdiagnostik	64
3.6	Radiologische Auswertung	65
3.7	Komplikationen	71
3.8	Fallbeispiele	72
4.	Diskussion	76
5.	Literaturverzeichnis	79
6.	Abbildungsverzeichnis	85
7.	Tabellenverzeichnis	87
	Anhang Studienprotokoll	88
	Anhang Fragebogen: Oswestry Disability Index	89

Glossar und Abkürzungen

A.	lat. Arteria
a.p.	anterior - posterior
ASIA	American Spinal Injury Association
bzw.	beziehungsweise
CaPh	Calciumphosphat
CT	Computertomografie
FDA	Food and Drug Administration
ggf.	gegebenenfalls
L	Lumbalsegment
lat.	lateinisch
Lig.	lat. Ligamentum
Ligg.	lat. Ligamenta (Plural)
ml	Milliliter
MPa	Megapascal
MRT	Magnetresonanztomografie
ODI	Oswestry Disability Index
PLC	posterior ligamentous complex
PMMA	Polymethylmethacrylat
Proc.	lat. Processus
Procc.	lat. Processus (Plural)
sog	so genannt
Th	Thorakalsegment
Vol.-%	Volumenprozent
z.b.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel der Arbeit

Thorakolumbale Berstungsfrakturen ohne neurologischer Ausfallsymptomatik stellen die Unfallchirurgie vor großen Herausforderungen und folgen keinem einheitlichen Behandlungsprinzip. Bei der instabilen Frakturform sind in der Regel sowohl vordere, als auch hintere Säule betroffen und zeigen bei isolierter Behandlung einer Säule keine guten Ergebnisse mit zum Teil erheblichen Korrekturverlusten nach der Operation. Aus diesem Grund wird an der Grazer Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie seit etlichen Jahren ein neues Verfahren zur Behandlung traumatischer Berstungsfrakturen eingesetzt. Dieses setzt sich aus zwei minimalinvasiven Eingriffen zusammen und besteht aus einer Wirbelkörperaugmentation mittels Ballonkyphoplastie und einer perkutanen dorsalen Stabilisierung mittels Fixateur interne. Beide Techniken erfolgen über den dorsalen Zugang, führen unmittelbar nach der Operation zu einer sofortigen Schmerzreduktion und erlauben eine frühe Mobilisation und eine damit verbundene schnellere Rückkehr in den Alltag.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ergebnisse dieser Operationsmethode zu evaluieren. Hierfür wurden bei PatientInnen, die im Zeitraum von 2010 – 2015 zuerst mit der kombinierten Operation versorgt wurden und bei denen anschließend bereits die Explantation der dorsalen Instrumentierung durchgeführt wurde, klinische und radiologische Parameter ermittelt. Die Untersuchungen inkludierten dabei Messungen der Wirbelkörperhöhe und des bisegmentalen Kyphosewinkels präoperativ, postoperativ, vor und mindestens 6 Monate nach Metallentfernung, sowie die Evaluierung möglicher körperlicher Einschränkungen mittels Oswestry Disability Index. Zusätzlich erfolgte im Rahmen der Abschlussuntersuchung eine klinische Untersuchung der Wirbelsäule um die lokale Beschwerdesymptomatik im ehemaligen Operationsgebiet zu erfassen.

Folgende Fragen waren vor Durchführung der Studie unklar und daher von besonderer Bedeutung:

1. Wie hoch ist der Korrekturverlust (posttraumatisch, vor Metallentfernung und 6 Monate nach Metallentfernung) im Sinne einer Änderung des bisegmentalen kyphotischen Winkels nach Cobb?
2. Wie groß ist der Wirbelkörperhöhenverlust? (posttraumatisch, vor Metallentfernung und 6 Monate nach Metallentfernung)
3. Wie ist das funktionelle Outcome der PatientInnen nach Metallentfernung?
4. Wie hoch ist die Komplikationsrate dieser Operationsmethode?

Die Ergebnisse dieser Studie sollen bei der Beantwortung der Frage helfen, ob dieses neue Operationsverfahren für die Behandlung traumatischer Berstungsfrakturen der Wirbelsäule geeignet ist.

1.2 Die Wirbelsäule

Die Wirbelsäule, als Grundlage des Stammes, hat für den menschlichen Körper zwei essentielle Funktionen. Sie dient einerseits als Stütze des Rumpfes und schützt wesentliche Organe im Bereich des Thorax und Abdomens, andererseits werden durch sie umfassende Bewegungen möglich. Hierfür besteht die Wirbelsäule aus 33 – 34 Wirbeln (Vertebrae) und den Zwischenwirbelscheiben (Disci intervertebrales), die gelenkig miteinander verbunden sind und von Bändern und Muskeln stabilisiert werden [1,2].

1.2.1 Anatomie

Als zentrales Achsenorgan unterteilt man die Wirbelsäule wie folgt in vier verschiedene Abschnitte mit jeweils unterschiedlicher Form und Anzahl an präsakralen Wirbeln:

- Halswirbelsäule (HWS) – 7 Halswirbel (Vertebrae cervicales)
- Brustwirbelsäule (BWS) – 12 Brustwirbel (Vertebrae thoracales)
- Lendenwirbelsäule (LWS) – 5 Lendenwirbel (Vertebrae lumbales)
- Sakralwirbelsäule (Os sacrum) – 5 Sakralwirbel (Vertebrae sacrales)

Unmittelbar an das Os sacrum schließt sich das Steißbein (Os coccygis) mit vier bis fünf verschmolzenen Wirbeln (Vertebrae coccygeae) an. Aufgrund der Synostosierung nennt man Sakral- und Steißwirbeln auch falsche Wirbel, während die übrigen, kranial des Kreuzbeines, als echte, präsakrale Wirbel bezeichnet werden. Evolutionsbedingt durch die Entwicklung des aufrechten Gangbildes weist die Wirbelsäule in der Sagittalebene eine physiologische Krümmung in Form eines doppelten S auf. Hals- und Lendenwirbelsäule sind nach ventral gekrümmt (Lordose), der Brust- und Kreuzbeinabschnitt nach dorsal (Kyphose) gebogen. Diese typische Krümmung der ausgewachsenen Wirbelsäule findet man beim Neugeborenen noch nicht vollständig vor. In der Regel kommt ein Säugling, bedingt durch die Lage im Mutterleib, ohne lordotische Streckung der Hals- und Lendenwirbelsäule zur Welt. Erst im Laufe des Wachstums wird die Nackenmuskulatur kräftiger und verformt die Halswirbelsäule in die entsprechende Lordose und mit Erlernen der Halte- und Bewegungsabläufe entwickelt sich unter Zuhilfenahme der Hüftgelenksstreckung die Lendenlordose. Die vollständige Umgestaltung der Wirbelsäule wird erst im Laufe der Pubertät beendet [2,3].

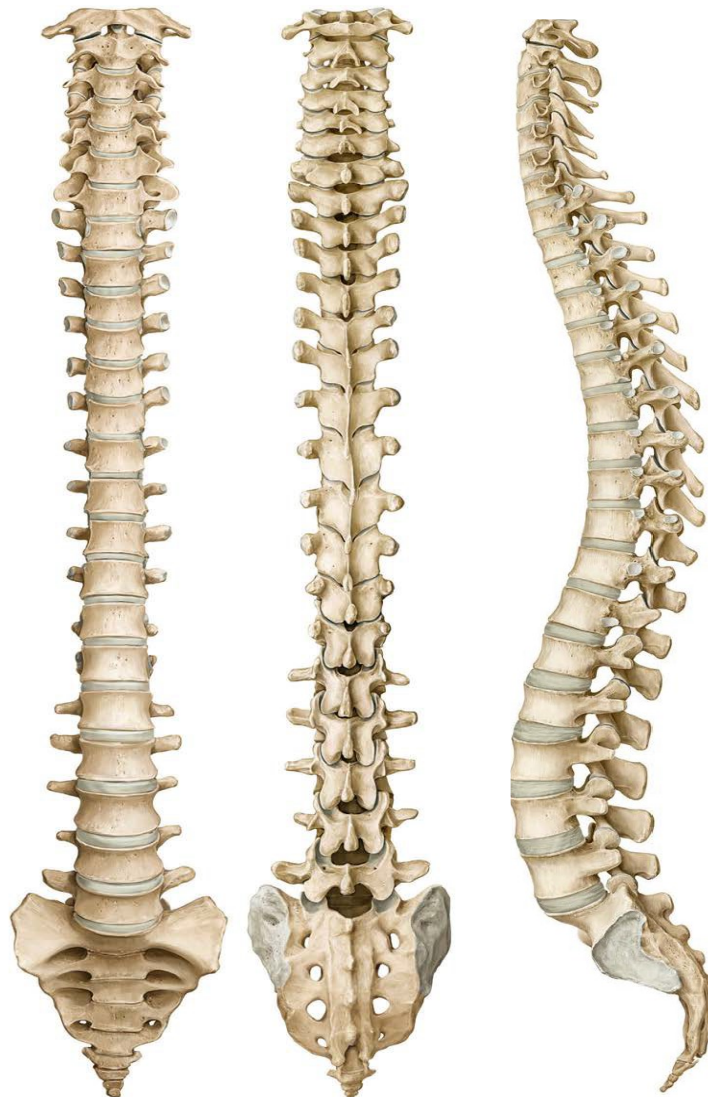


Abbildung 1: Knöchernen Wirbelsäule in der Ansicht von ventral, dorsal und lateral

Der Aufbau der Wirbel aller vier Segmente folgt, mit Ausnahme des ersten und zweiten Halswirbels, einem einheitlichen Grundprinzip und setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Wirbelkörper (Corpus vertebrae)
- Wirbelbogen (Arcus vertebrae)
- Dornfortsatz (Proc. spinosus)
- zwei Querfortsätze (Procc. transversi bzw. costales bei den Lendenwirbeln)
- vier Gelenkfortsätze (Procc. articulares)

Der Wirbelkörper bildet den ventralen Teil eines Wirbels und ist durch seine gute Festigkeit und Belastbarkeit Träger der Hauptmasse. Die Kortikalis im äußeren Bereich ist sehr dünn aber dennoch fest, die kompakte Spongiosa im Inneren besitzt Knochenbälkchen, die vertikal entlang der biomechanischen Hauptspannungsrichtung ausgerichtet sind. An den Endflächen, sowohl kranial als auch kaudal, werden die Wirbel durch Randleisten verstärkt und mittels Zwischenwirbelscheiben mit den benachbarten Wirbelkörpern beweglich verbunden. An der Rückfläche des Wirbelkörpers geht der Wirbelbogen aus zwei Wurzelanteilen hervor. Er trägt drei unterschiedliche Fortsätze, zwei Querfortsätze seitlich, zwei Gelenkfortsätze oben und unten sowie einen Dornfortsatz an der dorsalen Seite. Sie dienen Muskeln und Bändern als Ansatz und sind an der Gelenkbildung beteiligt. Die dorsale Seite des Wirbelkörpers bildet gemeinsam mit dem Wirbelbogen das Wirbelloch (Foramen vertebrale) und enthält schützend das Rückenmark. Betrachtet man den Wirbelkanal in seiner Gesamtheit, erkennt man entlang des Verlaufes Aussparungen, die sog. Zwischenwirbellöcher. Sie werden durch Einkerbungen an der dorsalen und kaudalen Seite der Wirbelkörper gebildet und ermöglichen den Austritt der Spinalnerven in die Peripherie. Der Durchmesser der Zwischenwirbellöcher nimmt dabei von kranial nach kaudal konsekutiv ab.

Die Gelenkfortsätze beider Seiten sind mit Knorpel überzogen und bilden mit dem jeweils benachbarten Fortsatz die Wirbelbogengelenke, *Articulationes zygapophysiales*. Gemeinsam mit den Bandscheiben sind sie, abhängig von der Stellung der Gelenkflächen, für die Bewegung in allen Ebenen zuständig.

In den jeweiligen Abschnitten der Wirbelsäule variieren die einzelnen Wirbel in ihrer Größe und weisen spezifische Merkmale auf. Um den Belastungen hinsichtlich des Körpergewichtes standzuhalten, werden die Wirbelkörper von kranial nach kaudal größer, während die Wirbellöcher konkordant zum Rückenmark an Durchmesser abnehmen. Zusätzlich kommt es dabei zu einer Änderung der Wirbelbogengeometrie und einer Abwandlung der benachbarten Fortsätze [1,3].

Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule besteht aus sieben Wirbeln, die ersten beiden, auch Atlas und Axis genannt, nehmen eine gesonderte Stellung ein und weichen erheblich von

der oben beschriebenen Grundform ab. Der Atlas besitzt keinen Wirbelkörper und trägt gemeinsam mit dem zweiten Halswirbel die Hauptlast des Kopfes, ermöglicht aber zugleich die Beweglichkeit des Kopfes in allen drei Freiheitsgraden. Der zweite Halswirbel besitzt nach oben hin einen zahnförmigen Fortsatz. Dieser ist im vorderen und hinteren Bereich mit Knorpel überzogen und geht mit dem ersten Halswirbel eine gelenkige Verbindung ein. Beide zusammen sind für die Hälfte der gesamten Rotation im Halsbereich zuständig. Die restlichen fünf Wirbel (C3-C7) des Abschnittes haben einen niedrigen Wirbelkörper, der Abstand zwischen den Deckplatten ist dorsal höher als ventral. Die Querfortsätze bilden mit der vorderen und hinteren Spange ein Foramen transversarium in dem ab dem 6. Halswirbel die A. vertebralis nach oben verläuft. Das Foramen vertebrale, zusammengesetzt aus Arcus und Corpus vertebrae, hat die Form eines Dreiecks und ist aufgrund ihrer Größe in der Lage, eine mögliche Schwellung des Rückenmarks zu kompensieren. Die breit und flach beschaffenen Gelenkfortsätze sind mit ihren nahezu planen Artikulationsflächen um rund 45 Grad gegen die Horizontale geneigt. Die Dornfortsätze der unteren Halswirbelsäule sind kurz und kräftig gebaut und oft mit einer gegabelten Spitze versehen. Lediglich der Dornfortsatz des letzten Halswirbels (Vertebra prominens) ist in seiner Länge und Stärke den anderen deutlich überlegen und lässt sich gut durch die Haut tasten [2,3].

Brustwirbelsäule

Die zwölf Wirbelkörper der Brustwirbelsäule nehmen aufgrund der größer werdenden mechanischen Belastung sowohl an Höhe, als auch an Breite zu und ähneln im distalen Abschnitt der angrenzenden Lendenwirbelsäule. Das Foramen vertebrale verliert seine dreieckige Form und wird zunehmend runder, der Durchmesser nimmt dabei gleichzeitig ab. Einzigartig für den Abschnitt der Brustwirbelsäule ist dabei die gelenkige Verbindung mit den zwölf Rippen, die gemeinsam mit dem Brustbein den Brustkorb bilden. Hierfür besitzen die Wirbelkörper spezielle Gelenksflächen, Foveae costales, die unter Zuhilfenahme der Zwischenwirbelscheiben je einen Rippenkopf für die Artikulation aufnehmen. Dabei teilen sich die Wirbelkörper zwei bis neun, je einen Rippenkopf, indem die Fovea costalis am oberen und unteren Rand entspringt. Der erste Wirbelkörper nimmt am Oberrand eine ganze Rippe auf und ist mit dem Unterrand zur Hälfte am darauffolgenden Rippenkopf beteiligt. Allein die letzten beiden Wirbelkörper

tragen für die elfte und zwölfte Rippe eine komplette Gelenkspfanne. Die Dornfortsätze sind lang und so stark nach kaudal gekrümmt, sodass sie mit ihrer dachziegelartigen Überlagerung das jeweils benachbarte Segment erreichen können. Die Querfortsätze sind weit nach lateral, im mittleren und unteren Abschnitt, zusätzlich nach dorsal gerichtet, um Platz für die Gelenkflächen zu schaffen [1,3].



Abbildung 2: Ansicht des 6. Brustwirbel von kranial, lateral und ventral

Lendenwirbelsäule

Die fünf Lendenwirbelkörper sind am kräftigsten gebaut und begrenzen mit ihren mächtig und wuchtig wirkenden Wirbelbögen ein allmählich dreieckiges Wirbelloch. Dorsal vereinigen sie sich zu hohen, nach hinten gekippten und beidseits abgeplatteten Dornfortsätzen. Die queren Fortsätze entsprechen entwicklungsgeschichtlich Rippenrudimente und werden daher *Processus costales* genannt. An deren dorsalen Seite entspringen die eigentlichen Querfortsätze der Lendenwirbelsäule, *Processus accessorii*, welche aber nur als kleine spitze Tuberkel ausgeprägt sind. Die oberen und unteren Gelenkfortsätze sind wiederum von merklicher Größe ausgebildet und besitzen beinahe senkrecht und sagittal ausgerichtete Gelenkflächen. Die oberen Gelenkfortsätze sind an den Außenflächen noch zusätzlich mit je einem *Processus mammillaris* ausgestattet, an denen die autochthone Rückenmuskulatur entspringen beziehungsweise ansetzen kann [3].



Abbildung 3: Ansicht des 2. Lendenwirbels von kranial, lateral und frontal

Bandscheiben

Die Bandscheiben sind jeweils zwischen zwei benachbarten Wirbelkörpern angeordnet und tragen mit einem Anteil von knapp einem Viertel wesentlich zur Gesamtlänge der präsakralen Wirbelsäule bei. Durch ihre konische, keilförmige Form stabilisieren sie die physiologische Krümmung der Wirbelsäule und sind maßgeblich an der passiven Beweglichkeit sowie am Gestaltbau beteiligt. Jede Zwischenwirbelscheibe setzt sich aus einem äußeren Faserring, Anulus fibrosus, und einem im Zentrum befindlichen weichen, gallertartigen Kern, Nucleus pulposus, zusammen.

Der Faserring besteht aus 10 bis 15 konzentrisch angeordneten Lagen an kollagenen Faserbündeln und gliedert sich in eine äußere und innere Zone. Die Außenzone enthält dabei vorwiegend Typ-1-Kollagenfasern und sorgt durch die überkreuzende Verlaufsrichtung und Verankerung in den Randleisten für die Verbindung zweier benachbarter Wirbeln. Die innere Schicht hingegen besteht aus faserknorpeligem Gewebe und strahlt mit den Typ-2-Kollagenfasern in die hyalinknorpeligen Endplatten der Wirbelkörper ein. Beide Mechanismen halten den Nucleus pulposus, der wasserbindende Glykosaminoglykane beinhaltet, in Spannung und verteilen sowohl von extern einwirkende Kräfte, als auch den vom Gallertkern verursachten permanenten Quellungsdruck gleichmäßig auf den Faserring der Bandscheibe auf.

Funktionell gleicht der Nucleus pulposus einem Wasserkissen und dient so gemeinsam mit dem Anulus fibrosus als Stoßdämpfer. Sein hoher Gehalt an Wasser, welcher bis zu 85 % betragen kann, wirkt sich während des ständigen Wechsels zwischen Be- und Entlastung auf die Dicke der Bandscheibe aus. Bei Belastung gibt der Gallertkern Wasser in die Umgebung ab, welches er im

Rahmen der Entlastung wieder aus den subchondralen Gefäßen der Knochenmarkräume zurückgewinnt. Diese druckabhängige Flüssigkeitsverschiebung ist gleichzeitig für die Ernährung der Bandscheibe wichtig und sorgt am Ende des Tages für eine Höhenminderung von bis zu drei Zentimeter im Bereich der gesamten Wirbelsäule. Dieser Höhenverlust ist reversibel und wird durch Phasen der Entlastung wieder ausgeglichen [1,3].

Bandapparat der Wirbelsäule

Die Bänder der Wirbelsäule erstrecken sich über ihre gesamte Länge und sorgen für eine kräftige Verbindung der Wirbel untereinander, um die einwirkenden hohen mechanischen Belastungen zu kompensieren.

Aufgrund der Lokalisation innerhalb der Wirbel werden Wirbelkörperbänder von Wirbelbogenbänder differenziert.

Wirbelkörperbänder:

- Ligamentum longitudinale anterius: Beginnt an der Schädelbasis und verläuft breitflächig an der Vorderfläche der Wirbelkörper bis zum Kreuzbein. Es geht eine feste Verbindung mit den Wirbelkörpern ein und ist an den Bandscheiben nur locker aneinander gefügt.
- Ligamentum longitudinale posterius: Zieht an der Hinterseite des Wirbelkörpers bis in den Sakralkanal hinein und ist, analog zum vorderen Längsband, dicht mit den Zwischenwirbelscheiben und im Bereich der Wirbelkörper nur an den Randleisten verwachsen.

Beide Längsbänder werden durch den Druck der Bandscheiben in Spannung gebracht und tragen so zur Aufrechterhaltung der Wirbelsäulenkrümmung bei. Des Weiteren schützen sie die Disci intervertebralis und sorgen für Stabilität beim Vor- und Rückwärtsneigen.

Wirbelbogenbänder:

- Ligamenta flava: Sie spannen sich zwischen den Wirbelbögen benachbarter Wirbel auf und bestehen zum Großteil aus elastischen Fasern, die zur typischen gelblichen Verfärbung und damit zur Bezeichnung dieser Bandverbindung führt. Sie unterstützen die Rückenmuskulatur und sind

bereits in Ruhezustand bei aufrechter Haltung gespannt. Diese Vorspannung sorgt einerseits für die Hemmung einer übermäßigen Vorwärtsneigung, andererseits wird diese zuvor gespeicherte Energie zur erleichterten Rückführung in die Ausgangslage genutzt.

- Ligamentum nuchae: Das runde Nackenband erstreckt sich von der Protuberantia occipitalis bis zum Dornfortsatz des siebten Halswirbels, der als Vertebra prominens durch die Haut tastbar ist. Die sagittale Ausrichtung ermöglicht den Ansatz von Muskulatur und setzt sich nach kaudal in das Lig. supraspinale und die Ligg. interspinalia fort.
- Ligamenta intertransversaria: Sind rundliche, kurze Bänder, die sich zwischen den Querfortsätzen befinden und im Bereich der Halswirbelsäule gänzlich fehlen können.
- Ligamenta interspinalia: Die sagittal stehenden Zwischendornfortsatzbänder verbinden die Dornfortsätze untereinander und wirken durch ihren schrägen Verlauf, Verschiebungen der Wirbel nach hinten entgegen.
- Ligamentum supraspinale: Befestigt an den Spitzen der Processus spinosi zieht es, vom letzten Halswirbel ausgehend, bis zum Os sacrum und sorgt so für eine durchgehende Verbindung der Wirbeln mit dem Kreuzbein.

[1-3]

Gelenke

- Articulatio atlantooccipitalis: Das obere Kopfgelenk entspricht der Form und Funktion eines Eigelenkes und stellt die Verbindung zwischen Hinterhauptbein und erstem Halswirbel (Atlas) dar. Das Gelenk ermöglicht Bewegungen nach vorne und hinten sowie eine geringe Seitwärtsneigung und Rotation um je 4 Grad.
- Articulatio atlantooccipitalis: Das untere Kopfgelenk setzt sich aus insgesamt vier Teilgelenken zusammen. Als mechanisches Zentrum artikuliert der Dens axis vorne mit der Fovea dentis und dorsal mit dem Ligamentum transversum atlantis. Die paarige Articulatio atlantoaxialis lateralis vervollständigt den Gelenkkomplex. Gemeinsam ermöglichen die Gelenke eine Seitwärtsneigung sowie eine ausgiebige Drehung von Kopf und Atlas um bis zu 40 Grad je Seite.

- Articulationes zygapophysiales: Die Zwischenwirbelgelenke, im klinischen Sprachgebrauch auch unter Wirbelbogengelenke oder kleine Wirbelgelenke bekannt, werden von den Gelenkfortsätzen (Procc. articulares) der Wirbelbögen gebildet. Die unterschiedliche Stellung der paarigen Gelenksflächen gegen die Horizontale bestimmt in den jeweiligen Wirbelsäulenabschnitten, Ausmaß und Richtung der Bewegung.
- Articulatio lumbosacralis: Die gelenkige Verbindung des lumbosakralen Überganges bildet der fünfte Lendenwirbel gemeinsam mit dem Kreuzbein.
- Articulatio sacrococcygea: Dieses bandverstärkte Gelenk stellt die Verbindung zwischen Os sacrum und Os coccygis her und gehört zur Gruppe der echten Gelenke.

[1,3]

1.2.2 Bewegungsumfang der Wirbelsäule

Die gesamte Beweglichkeit der Wirbelsäule nimmt von oben nach unten ab, dabei ist jeder Abschnitt auf bestimmte Bewegungen spezialisiert. Die Bewegung erfolgt dabei in den nach Junghans benannten Bewegungssegmenten, der kleinsten Bewegungseinheiten der Wirbelsäule. Ein Segment ist definiert als die gelenkige und muskuläre Verbindung zwischen zwei Wirbeln und beinhaltet die Bandscheibe, die paarig angelegten Wirbelbogengelenke sowie die abschnittsspezifischen Bänder und Muskeln. Die Beweglichkeit eines einzelnen Segmentes ist mit Ausnahme der beiden Kopfgelenke (C1 und C2) gering, erst die Gesamtheit aller 25 Bewegungssegmente ist für die große Bewegungsfreiheit der Wirbelsäule verantwortlich [1,2].

Dabei differenziert man in drei Ebenen folgende Hauptbewegungen:

- Sagittalebene: Beugung und Streckung des Rumpfes (Ventralflexion und Dorsalextension) bzw. Vor- und Rückneigen des Kopfes (Inklination und Reklination)
- Frontalebene: Neigung zur Seite (Lateralflexion)
- Horizontalebene: Drehung (Rotation)

Der Hauptanteil der Ventralflexion und Dorsalextension geschieht in den Abschnitten der Hals- und Lendenwirbelsäule. Hervorzuheben ist eine ausgeprägte Beugung nach hinten im Bereich der unteren Halswirbelsäule, am thorakolumbalen Übergang (11. Brustwirbel bis 2. Lendenwirbel) sowie in den kaudalen Segmenten der Lendenwirbelsäule. Dieses hohe Maß an Beweglichkeit in den genannten Abschnitten resultiert aber in einer erhöhten Anfälligkeit für traumatische und degenerative Erkrankungen. Im thorakalen Bereich hingegen ist besonders die Dorsalextension, aufgrund der langen und dachziegelartig angeordneten Dornfortsätze, eingeschränkt.

Die Fähigkeit der Seitneigung ist in den zervikalen und lumbalen Segmenten ähnlich, in der Brustwirbelsäule am größten, jedoch besonders innerhalb der Lendenwirbelsäule stark altersabhängig. So ist die Lateralflexion bei Kindern um bis zu 60° je Seite möglich, Menschen im mittleren Lebensabschnitt hingegen

können den Lendenbereich nur noch um etwa 20° nach rechts und links neigen. Rotationen finden vor allem in der Hals- und Brustwirbelsäule statt, das untere Kopfgelenk im Zervikalbereich ist aber besonders hervorzuheben. Die Drehbewegung ist hier um bis zu 70° (35° zu jeder Seite) möglich und beträgt dadurch mehr als die Hälfte der gesamten Rotation innerhalb der Halswirbelsäule, welche bei rund 100° liegt [1,2,4].

1.3 Wirbelkörperfrakturen

1.3.1 Definition und Mechanismen einer Fraktur

Unter einer Fraktur (von lat. "frangere") versteht man eine Unterbrechung der Kontinuität eines Knochens, hervorgerufen durch eine Belastung, die über die Elastizitätsgrenze hinausgeht. Anhand des Entstehungsmechanismus unterscheidet man traumatische Frakturen von Ermüdungs- und pathologischen Frakturen. Bei der traumatischen Form kommt es, aufgrund direkter oder indirekter Gewalteinwirkung, zu einer Überschreitung der Belastungsgrenze des Knochens. Bei der indirekten Belastung bzw. Überlastung des Knochens spielen vor allem Zug-, Kompressions-, Scher-, oder Drehkräfte eine entscheidende Rolle. Wirkt auf ein intaktes Knochengewebe hingegen eine gleichförmige rezidivierende oder persistierende mechanische Überbeanspruchung ein, kann es zu einer Ermüdungsfraktur, auch Stressfraktur genannt, kommen. Sie treten oft bei Gelenksabschnitten auf, welche besonderen Belastungen ausgesetzt sind. Ein typisches Beispiel ist die Marschfraktur, bei der es durch die längere, oftmals auch ungewohnte Gehbelastung zu Brüchen im Bereich der Mittelfußknochen kommt. Pathologische Frakturen entstehen im krankhaft vorgeschädigten und mechanisch vermindert belastbaren Knochen. Bereits eine relativ geringe Krafteinwirkung, die weit unter der physiologischen Belastungsgrenze des Knochens liegt, reicht aus, um eine vollständige Kontinuitätsunterbrechung zu verursachen. Häufige Ursachen sind generalisierte Erkrankungen der Knochen, die zu einer Reduktion der Knochenqualität oder Knochenmasse führen (Osteoporose, Osteogenesis imperfecta) oder lokal destruierende Knochenmetastasen von Schilddrüsen-, Mamma-, Prostata-, Bronchial- und Nierenzellkarzinomen. Primäre Knochtumore, sowohl benigner als auch maligner Art, werden weniger häufig beobachtet [5-7].

1.3.2 Allgemeine Informationen

Traumatisch bedingte Schädigungen der Wirbelsäule zeigen eine große Varianz an häufigen, aber auch seltenen Verletzungsmustern und verursachen mehr als alle übrigen Verletzungen des Bewegungsapparates eine wesentliche Bedrohung

des Lebens und in weiterer Folge eine Einschränkung der Lebensqualität. Durch die unmittelbare Nähe der Wirbelsäule zum Rückenmark sind bei solchen Verletzungen häufig neurogene Strukturen mitbeteiligt, welche für die schlechten funktionellen Ergebnisse und der niedrigen Wiedereingliederungsrate in das Berufsleben verantwortlich sind. Die junge Wirbelsäulenchirurgie, die als letzter Skelettabschnitt für die operative Therapie erschlossen wurde, wird ständig in Bezug auf die Anwendung operativer Verfahren weiterentwickelt und befindet sich unter laufender Diskussion bezüglich der Abgrenzung zwischen konservativer und operativer Indikationsstellung [8,9].

1.3.3 Epidemiologie

Sucht man in der Literatur nach genauen Daten zur Häufigkeit von Wirbelkörperfrakturen findet man nur Schätzungen beziehungsweise Hochrechnungen. Dies liegt einerseits daran, dass Frakturen in diesem Bereich mit einer großen klinischen Varianz einhergehen und ein Teil davon konservativ oder gar nicht behandelt wird, andererseits ist in der Vergangenheit bei schweren Polytraumen aus Prioritätsgründen gegenüber anderen Verletzungen eine entsprechende Diagnostik und infolge dessen die Erfassung eines Bruches unterblieben. Aus Hochrechnungen geht hervor, dass sich in Deutschland rund 10.000 schwerwiegende Wirbelsäulenverletzungen pro Jahr ereignen, in der USA spricht man von 150.000 - 160.000 traumatischen Wirbelkörperfrakturen, bei circa einem Zehntel davon findet man auch eine Beteiligung des Rückenmarks. Vergleichbare Daten für Österreich konnten nicht gefunden werden.

Segmental betrachtet, ereignen sich rund 20 % der Frakturen im Bereich der Halswirbelsäule, die restlichen 80 % verteilen sich auf Brust- und Lendenwirbelsäule [8,9].

Zusätzlich wird die Brust- und Lendenwirbelsäule in drei frakturrelevante Bereiche eingeteilt: Kranial beginnend liegt der thorakale, kyphotisch gekrümmte Teil (Th1 - Th10), gefolgt vom thorakolumbalen Übergang (Th11 - L2) und der lordotischen gekrümmten unteren Lendenwirbelsäule (L3 - L5).

Von diesen drei Bereichen nimmt der thorakolumbale Übergang eine gesonderte Stellung ein, da rund die Hälfte aller Wirbelsäulenfrakturen in diesem Bereich

lokalisiert ist. Ursächlich für diese Häufung sind besondere anatomische Gegebenheiten. Der Verlust des Brustkorbes als schützende und stabilisierende Maßnahme und der Übergang von der Brustkyphose in die Lendenlordose spielen dabei eine wichtige Rolle. Aber auch die Änderung der kleinen Wirbelgelenke in eine zunehmend sagittale Ausrichtung und der daraus stark ansteigenden Drehsteifigkeit sorgen für eine größere Frakturanfälligkeit [10].

Der am häufigsten frakturierte Wirbelkörper im Bereich der gesamten Wirbelsäule ist, wie von der Mehrzahl der Autoren angegeben, der erste Lendenwirbelkörper. Magerl et al. untersuchten 1992 insgesamt 1445 Patienten mit Wirbelbrüchen im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule, davon hatten 402 Patienten (27,8 %) Frakturen des ersten Lendenwirbels [11]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Reinhold et al., die 2010 in einer internetbasierten Multicenterstudie insgesamt 733 Patienten mit thorakolumbalen Verletzungen untersuchten [12].

Rund zwei Drittel (60 - 66,8 %) aller traumatischen Wirbelfrakturen betreffen das männliche Geschlecht bei einem deutlichen Altersgipfel zwischen 20 und 40 Jahren. Im europäischen Raum zählen Verkehrsunfälle, Stürze aus großer Höhe und Verletzungen im Sport zu den Hauptursachen. Seltener Ursachen dagegen sind Stich- und Schussverletzungen, "Verhebetraumata", oder epileptische Anfälle [8,10].

1.3.4 Klassifikationssysteme traumatischer Frakturen im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule

Eine ideale Klassifikation soll einem einfachen Algorithmus folgen, der sowohl radiologische und klinische Charakteristika beinhaltet, als auch Informationen über den Schweregrad und der Prognose einer Verletzung und deren Therapieoptionen vermittelt. Übertragen auf den thorakolumbalen Bereich, ist die Grundlage für eine bestmögliche Behandlung, ein umfassendes Wissen und Verständnis über Verletzungsmuster unter Einbeziehung von Frakturform, Beschaffenheit des ligamentären Komplexes und der neurologischen Ausfallsymptomatik. Dabei soll eine standardisierte Klassifikation die Kommunikation mit anderen Berufsgruppen erleichtern und einen internationalen Vergleich von Ergebnissen ermöglichen. Seit nun mehr als 80 Jahren hat man eine Vielzahl an Klassifikationen entwickelt, jedoch keines erlangte, aufgrund der hohen Anforderungen und der Komplexität der Verletzungen, eine allgemeingültige internationale Akzeptanz [8,13].

1.3.4.1 Historische Entwicklung

Im Jahre 1929 entwickelte Böhler die erste Klassifikation für thorakolumbale Verletzungen. Hierfür teilte er Verletzungen, basierend auf Frakturmorphologie und Verletzungsmechanismen, in folgende fünf Gruppen ein [14]:

- Kompressionsfrakturen,
- Flexion-Distraktionsverletzungen,
- Extensionsverletzungen,
- Scherbrüche
- Rotationsverletzungen

1938 untersuchte Watson-Jones 252 Fälle und erkannte, dass der Zustand des "posterior ligamentous complex" (PLC) einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität einer Fraktur hat. Der Bandapparat wird aus drei Bändern, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Lig. flavum und den Kapseln der Facettengelenken

gebildet. Seine Klassifikation beinhaltet insgesamt vier verschiedene Gruppen an Frakturen [15].

Elf Jahre später differenzierte Nicoll erstmals zwischen stabilen und instabilen Frakturen und plädierte, bei jeder Verletzung, Wirbelkörper, Bandscheibe, Facettengelenke und Zwischendornfortsatzband gesondert zu beurteilen. Seiner Ansicht nach waren vordere und seitliche Keilfrakturen oberhalb des vierten Lendenwirbels stabil und somit konservativ behandelbar, Frakturen darunter galten prinzipiell als instabil einzustufen [16].

Holdsworth untersuchte 1970 insgesamt 1000 Patienten mit Wirbelsäulenverletzungen und neurologischer Symptomatik und reformierte mit der Einführung des Zwei-Säulen Konzeptes das Klassifikationssystem. Dabei teilte er die Wirbelsäule in eine vordere und hintere Säule ein. Der vordere Teil beinhaltet Wirbelkörper und Bandscheibe, der hintere Teil besteht aus den Facettengelenken und dem "posterior ligamentous complex". Basierend auf den Zustand der hinteren Säule unterschied er zwischen stabilen und instabilen Verletzungen und teilte Brüche, anhand der einwirkenden Kräfte, in fünf Gruppen ein. Dabei führte er erstmals in der Geschichte die Gruppe der durch Kompressionskräfte verursachten Berstungsfrakturen ein, die in seiner Arbeit als stabil angesehen wurden. Generell erlangte Holdsworth mit seiner Arbeit große Aufmerksamkeit und lieferte das Fundament, auf welchem die nachfolgenden Klassifikationen aufbauen konnten [17].

Einen weiteren Meilenstein setzte Denis im Jahre 1983 mit der Erkenntnis, dass die isolierte Ruptur des PLC, wie Holdsworth zuvor angenommen hat, biomechanisch nicht zur Instabilität führt. Erst die zusätzliche Ruptur des hinteren Längsbandes in Kombination mit der Verletzung der Bandscheibe im hinteren Bereich des Wirbelkörpers verursacht eine Instabilität. Für seine Theorie modifizierte er das Zweisäulenkonzept, indem er einen zusätzlichen dritten Bereich definierte.

Die drei Säulen wurden wie folgt eingeteilt in:

- vordere Säule: ventrale 2/3 des Wirbelkörpers mit Bandscheibe und Lig. longitudinale anterior
 - mittlere Säule: dorsale 1/3 des Wirbelkörpers mit Bandscheibe und Lig. longitudinale posterior
 - hintere Säule: Facettengelenke, Wirbelbögen und dorsaler Bandapparat
- [18,19]

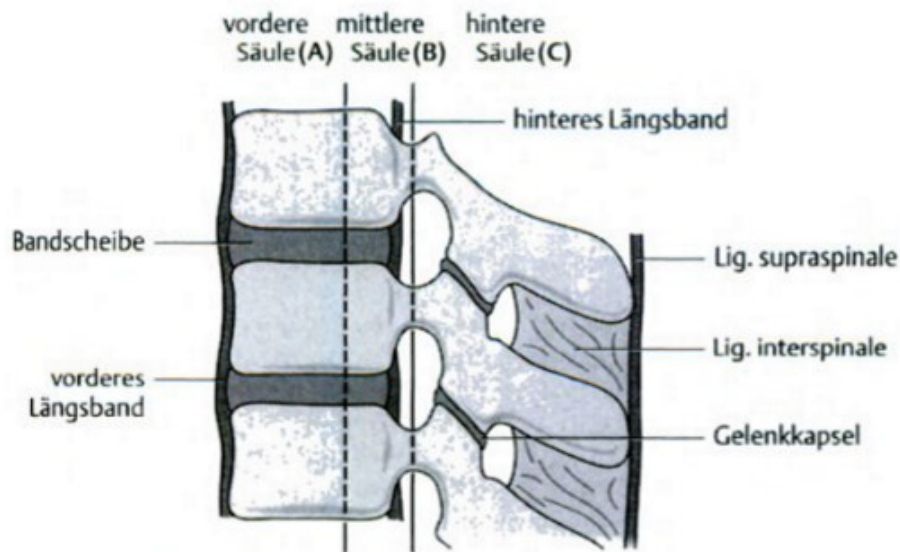


Abbildung 4: 3-Säulen-Modell nach Denis

In seiner Klassifikation differenzierte er anhand des Verletzungsmusters zwischen leichten und schweren Verletzungen. Unter leichten Verletzungen versteht man Frakturen der Quer- und Dornfortsätze, Partes interarticulares und der Gelenkfortsätze. Basierend auf den Verletzungsmechanismus, werden die schweren Formen in vier große Gruppen eingeteilt [20]:

Typ I	Kompression	Verletzung der vorderen Säule, mittlere Säule intakt
Typ II	Berstungsfraktur	Zerstörung der vorderen und mittleren Säule
Typ III	Flexions-Distraktions-Verletzung (seat-belt type fracture)	Verletzung der hinteren und mittleren Säule
Typ IV	Frakturdislokation	Beteiligung aller 3 Säulen durch Kompression, Zug, Rotation oder Scherkräfte

Tabelle 1: Frakturklassifikation nach Denis

Jeder Typ wurde noch weiter in einzelne Untergruppen, insgesamt 16 an der Zahl, aufgeteilt. Als instabil einzustufende Frakturen sind nach Denis Verletzungen, bei denen mindestens zwei Säulen betroffen sind. Seiner Ansicht nach waren nun auch die Gruppe der Berstungsfrakturen instabile Verletzungen [18].

Noch im gleichen Jahr aber analysierte McAfee die CT-Bilder von 100 thorakolumbalen Verletzungen und unterteilte erstmalig Kompressionsfrakturen in stabile und instabile Frakturen. Während bei der stabilen Form vordere und mittlere Säule durch Kompressionskräfte beeinträchtigt werden, sind bei instabilen Brüchen zusätzlich auch Teile der hinteren Säule durch axiale Kompression, laterale Flexion oder Rotation betroffen [21].

Für großes Aufsehen sorgten Magerl et. al mit der Veröffentlichung ihres neuen Klassifikationssystems im Jahre 1994, das bis heute eine breite internationale Anwendung findet. Basierend auf das Zwei- bzw. Dreisäulenkonzept von Holdsworth und Denis entwickelten die Autoren nach Untersuchungen an mehr als 1400 PatientInnen über einen Zeitraum von 10 Jahren die AO Klassifikation der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen bei Wirbelsäulenverletzungen. Dieses systematische und detaillierte Schema berücksichtigt die Kräfte, welche primär auf die Wirbelsäule einwirken, erfasst genauestens die entstandenen Schäden eines betroffenen Segments und lässt auch Begleitverletzungen der Weichteile in die Klassifikation einfließen. Nach dem Mechanismus der Verletzung erfolgt die Einteilung in drei Typen, sowie eine weitere Differenzierung in Gruppen und Untergruppen anhand frakturmorphologischer Eigenschaften. Bei Typ A - Verletzungen handelt es sich um Kompressionsfrakturen der Wirbelkörper, die durch axiale Stauchung oder Flexion entstehen. Typ B - Verletzungen stellen Distractionsverletzungen mit Beteiligung der ventralen und dorsalen Elemente dar. Bei Typ C - Frakturen sind immer beide Säulen betroffen und finden ihre Ursachen in einem komplexen Rotationsmechanismus mit Zerreißen der längsverlaufenden Bänder. Ausmaß und Schwere der Verletzung nehmen von Typ A nach Typ C und innerhalb derer Gruppen und Subgruppen zu [11].

Vaccaro et al. kritisierten die AO-Klassifikation, da sie weder die Integrität des PLC, noch einen neurologischen Status berücksichtigt und mit den vielen

Untergruppen zu komplex für den klinischen, routinemäßigen Einsatz sei. Sie entwickelten 2005 den Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score (TLICS), ein Punktesystem, das Frakturmorphologie und die oben genannten Kritikpunkte beinhaltet. Trotz der hohen klinischen Relevanz mit der Möglichkeit einer quantifizierten Ermittlung der Verletzungsschwere, missglückte auch diesem System der Durchbruch. Die Verfügbarkeit sowie Sensitivität und Spezifität der Magnetresonanztomografie zur Beurteilung des dorsalen Zuggurtungsmechanismus (PLC), die grobe Einteilung der Frakturmorphologie und die fehlende Differenzierung der verschiedenen operativen Methoden dürften dabei eine Rolle spielen [13,22].

Um die Schwachpunkte der bestehenden Klassifikationen auszumerzen, führte das "AOSpine Knowledge Forum Trauma/SCI", eine Arbeitsgruppe der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO), 2013 ein neues Klassifikationssystem ein. Die so genannte AOSpine Klassifikation stellt eine Revision der bis zuletzt verwendeten AO-Magerl-Klassifikation dar und berücksichtigt auch die im TLICS verwendeten klinisch relevanten Faktoren. Die Gliederung erfolgt auch hier in 3 Grundtypen (Typ A-C) mit Untergruppen, jedoch werden Frakturen nicht anhand der einwirkenden Kräfte, wie dies bei der Magerl-Klassifikation der Fall ist, sondern anhand der Instabilität klassifiziert. Während dabei der Verletzungsmechanismus in den Hintergrund rückt, ist der Zustand des vorderen und hinteren Zuggurtungsmechanismus von großer Bedeutung. Sie stellt die aktuellste Klassifikation der thorakolumbalen Verletzungen dar und wird seit 2014 international verwendet. Auch an der Grazer Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie wird dieses Schema zur Beurteilung von Wirbelsäulenfrakturen herangezogen [13].

1.3.4.2 AOSpine Klassifikation

Im nachfolgenden Teil wird die AOSpine Klassifikation näher betrachtet [13,23].

Zur umfassenden Beurteilung von Frakturen im thorakolumbalen Bereich bilden folgende drei Elemente die Grundlage der Klassifikation:

- Frakturmorphologie
- neurologische Schädigung
- klinisch relevante Modifikatoren

Die Einteilung anhand der Frakturmorphologie erfolgt in 3 Hauptgruppen:

- Typ A: isolierte Kompressionsverletzungen des Wirbelkörpers (5 Subtypen)
- Typ B: Distraktionsverletzungen ohne gravierender translatorischer Instabilität (3 Subtypen)
- Typ C: Translationsverletzungen mit kompletter Zerreißung der Wirbelsäule (keine eigenen Subtypen)

Ähnlich wie bei der Klassifikation nach Magerl nimmt dabei der Schweregrad der Verletzung von Typ A nach C zu.

Typ A - Verletzungen

Zu den Typ A - Verletzungen zählen im Wesentlichen Verletzungen des vorderen Wirbelkörpers mit dazugehöriger Bandscheibe und isolierte leichte Verletzungen im dorsalen Wirbelsäulenanteil (Dorn- und Querfortsätze). Dabei ist der dorsale Zuggurtungsmechanismus intakt und eine Verschiebung der Wirbelkörper gegeneinander nicht möglich. Verletzungen dieser Art sind mit 54 % die häufigste Form.

Subtyp A0: Infraktions- und/oder Fortsatzbruch

Darunter fallen neben Frakturen der Dorn- und Querfortsätze auch unvollständige Knochenbrüche im Bereich des Wirbelkörpers, die radiologisch nur mittels Magnetresonanztomografie in Form eines Knochenmarködems diagnostiziert werden können. Diese Gruppe wird klinisch keiner Bedeutung zugeschrieben, da sie keinen Einfluss auf die Stabilität haben.

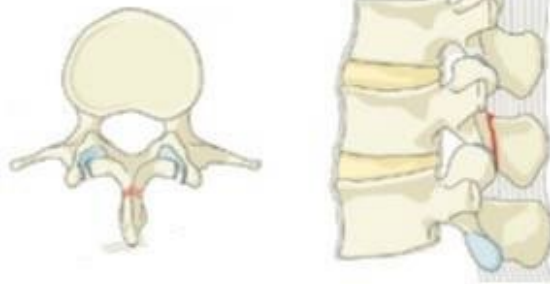


Abbildung 5: Subtyp A0

Subtyp A1: Impaktionsbruch

Isolierte Endplattenimpressionsfraktur ohne Beteiligung der Hinterkante.

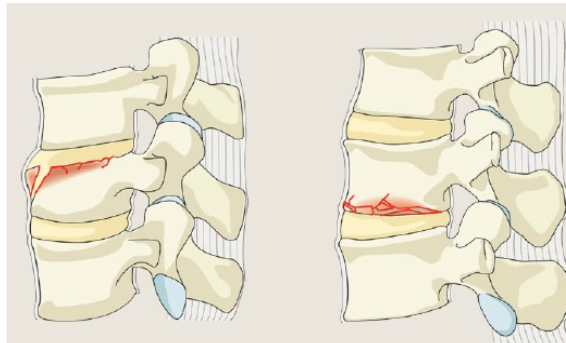


Abbildung 6: Subtyp A1

Subtyp A2: Spaltbruch

Spaltbruch mit senkrechter Frakturlinie, die durch beide Endplatten verläuft. Die Wirbelkörperhinterkante bleibt intakt.

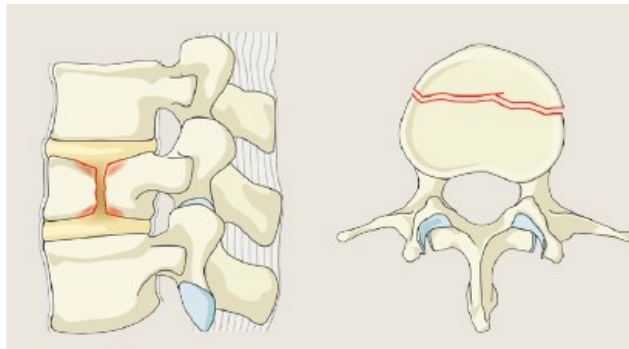


Abbildung 7: Subtyp A2

Subtyp A3: Inkomplette Berstungsfraktur

Berstungsfraktur einer Endplatte mit Beteiligung der Hinterkante und des Spinalkanals. Zusätzlich findet sich in der Mehrheit der Fälle eine vertikale Fraktur der Lamina ohne Verletzung des Bandapparates.

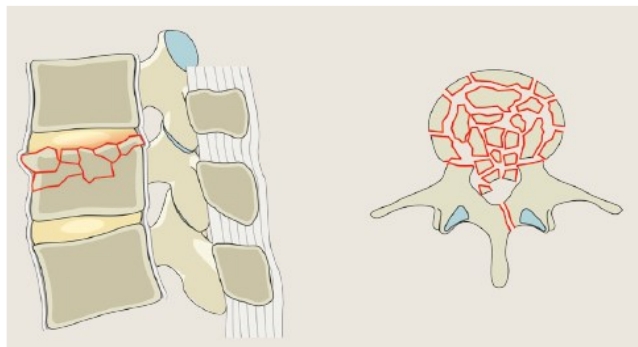


Abbildung 8: Subtyp A3

Subtyp A4: Komplette Berstungsfraktur

Berstung beider Endplatten mit Beteiligung der Hinterkante und des Spinalkanals. Ähnlich wie beim Subtyp A3 kann auch hier die Lamina frakturiert sein.

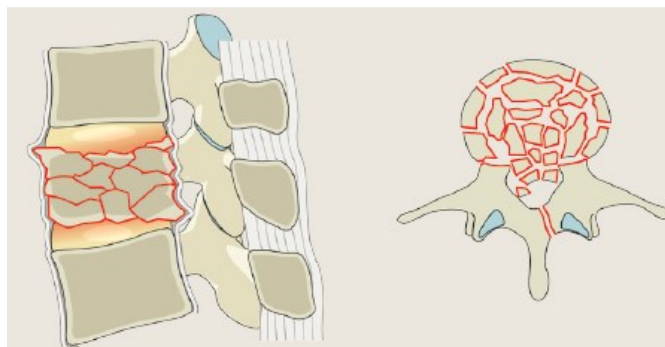


Abbildung 9: Subtyp A4

Typ B – Verletzungen

Die Distraktionsverletzungen weisen eine Zerstörung des vorderen oder hinteren Zuggurtungsmechanismus auf und treten häufig in Kombination mit Typ A - Verletzungen des Wirbelkörpers auf. Sie gliedern sich weiter in insgesamt 3 Subgruppen auf.

Subtyp B1: Chance-Fraktur

Auf ein Segment beschränkte, rein knöcherne Zerreißung der hinteren Zuggurtung, die bis in den vorderen Bereich des Wirbelkörpers ausstrahlen kann.

Subtyp B2: Verletzung der dorsalen Zuggurtung

Ligamentäre oder osteoligamentäre Zerreißung des hinteren Zuggurtungsmechanismus mit Beteiligung eines gesamten Bewegungssegments. Zusätzlich auftretende Kompressionsfrakturen im Wirbelkörper sollten getrennt, anhand der Typ A - Verletzungen klassifiziert werden.

Subtyp B3: Überstreckungsverletzungen

Durch einen Überstreckungsmechanismus verursachte Zerreißung des anterioren Ligamentkomplexes mit Verlauf der Frakturlinie durch die Bandscheibe und/oder den Wirbelkörper. Da die hintere Zuggurtung intakt ist, können auch keine größeren Translationsbewegungen auftreten. Verletzungen dieses Subtyps treten überwiegend bei der ankylosierenden Wirbelsäule auf.

Typ C – Verletzungen

All jene Verletzungen, die zu Dislokationen und Translationsbewegungen über das physiologische Maß hinaus führen, bilden die Gruppe der Typ C - Verletzungen. Die Hypermobilität wird bedingt durch eine vollkommene Zerreißung der Wirbelsäule, die mit der Unterbrechung beider Zuggurtungsmechanismen einhergehen. Aufgrund der vielfältig möglichen Verletzungsmuster innerhalb dieses Typs, wird auf eine weitere Unterteilung in Subgruppen verzichtet. Bestehen zusätzliche Kompressions- (Typ A) oder Distraktionsverletzungen (Typ B) ist eine separate Klassifikation im Hinblick auf Verständnis des Unfallherganges und darauffolgender Therapieentscheidung empfohlen.

Das Ausmaß einer neurologischen Schädigung nimmt, hinsichtlich Prognose und Therapieentscheidung, einen großen Stellenwert ein und ist ein Kernstück dieser neuen Klassifikation. Die Beurteilung erfolgt hierfür anhand einer 5-stufigen Skala:

- N0: keine Einschränkung der neurologischen Funktion
- N1: vorübergehendes neurologisches Defizit mit vollständiger Rückbildung
- N2: radikuläres Defizit
- N3: inkomplette Querschnittläsion entsprechend der Einteilung der American Spinal Injury Association (ASIA) Grad D bis B
- N4: komplette Querschnittläsion entsprechend ASIA Grad A
- NX: kein neurologischer Status aufgrund von z.B. Sedierung oder Schädel-Hirn-Verletzungen erhebbar

Bei der detaillierten Analyse der 750 radiologischen Bilder traumatischer Wirbelsäulenverletzungen, konnten die Autoren bei einem kleinen Teil der Fälle nicht eindeutig die optimale Therapieentscheidung abwägen. Hierfür entwickelten sie zwei, optional anwendbare, Modifikationsparameter, die bei der Entscheidungsfindung einen signifikanten Einfluss nehmen können.

- M1: Dieser Modifikator kommt zur Anwendung, wenn primär ein stabiler knöcherner Zustand der Fraktur angenommen wird, eine Verletzung der Ligamentkomplexe aber mit Sicherheit nicht ausgeschlossen werden kann. Dies kann daran liegen, dass die Kombination aus klinischer Untersuchung und MRT keine eindeutigen Ergebnisse liefert oder die MRT-Diagnostik nicht verfügbar oder noch ausständig ist.
- M2: Ist eine eindeutige Empfehlung der Therapie nicht gegeben, kann dieser Parameter bei der Entscheidung zwischen einem konservativen oder operativen Vorgehen helfen. Er enthält patientenspezifische Begleiterkrankungen wie etwa Osteopenie/Osteoporose, Morbus Bechterew, Spondylosis hyperostotica und berücksichtigt auch Weichteilinfektionen und Verbrennungen im Operationsgebiet.

1.3.5 Diagnostik thorakolumbalen Verletzungen

Die Diagnostik von Wirbelsäulenverletzungen stellt eine große Herausforderung dar, da sie in der Vergangenheit laut Literaturangaben in 20 – 38 % der Fälle entweder zu spät oder gar nicht erkannt wurden. Dies liegt einerseits daran, dass PatientInnen, vor allem bei Frakturen im Brust- und Lendenwirbelbereich, so eine geringe Beschwerdesymptomatik zeigen, dass sie keinen Arzt konsultieren oder eine weiterführende Diagnostik als nicht notwendig erachtet wird. Auf der anderen Seite werden bei polytraumatisierten PatientInnen nach Blauth et. al in bis zu 20% der Fälle, Frakturen initial übersehen. Mögliche Gründe dafür sind, dass die Patienten oftmals nicht ansprechbar sind, andere Verletzungen im Vordergrund stehen oder der Zeitdruck des behandelten Personals in dieser Phase besonders hoch ist. Dementsprechend sind sowohl die Erhebung der Anamnese, als auch eine exakte klinische Untersuchung für das weitere Vorgehen von besonderer Bedeutung.

Die Erhebung der Anamnese bzw. das Einholen von anamnestischen Angaben bei polytraumatisierten PatientInnen liefert wichtige Erkenntnisse zum Unfallhergang. Der lokal anhaltende Schmerz von stechendem Charakter, ohne Ausstrahlung in die Peripherie, ist das häufigste Symptom, welches von den Betroffenen angegeben wird. Das Erfragen der Langzeitanamnese nach bestehenden Wirbelsäulenerkrankungen, früheren Verletzungen und Voroperationen kann für die spätere Planung der Therapie entscheidend sein. Die klinische Untersuchung kann nicht nur den Verdacht einer Wirbelsäulenverletzung erhärten, sondern bereits vorab Informationen über Lokalisation und Art der Läsion bringen. Nach vorsichtiger Umlagerung des Patienten (sog. „log roll Manöver“) steht am Beginn der Untersuchung die Inspektion des Rückens. Dabei erfasst man mögliche Schürfwunden, Prellmarken, Hämatome und Lacerationen, eine sichtbare Knickbildung der Wirbelsäule (Gibbus) deutet meist auf eine hochgradige Verletzung hin. Bei der anschließenden Palpation sucht man nach etwaigen Lücken und Krepitationen in den Dornfortsatzreihen und prüft lokale Druck- und Klopferschmerzhaftigkeit, die allesamt auf ligamentäre Verletzungen hinweisen würden. Da das Rückenmark auf Höhe des ersten Lendenwirbels, bei einigen Patienten ein Segment tiefer endet und sich distal in die Cauda equina fortsetzt, können unterschiedlichste neurologische Verletzungsmuster bestehen.

Eine exakte neurologische Stuserhebung ist daher bei jedem Wirbelsäulentrauma notwendig und soll Motorik, Sensibilität und Reflexe überprüfen. Nach Literaturangaben haben sich zur Dokumentation neurologischer Defizite, die Kriterien der American Spine Injury Association (ASIA) durchgesetzt. Alternativ wird auch das Klassifikationssystem von Frankel verwendet. Bei Vorliegen eines pathologischen Befundes sollte zur Planung des weiteren Prozederes auch ein Neurologe hinzugezogen werden [10,24-30].

ASIA

STANDARD NEUROLOGICAL CLASSIFICATION OF SPINAL CORD INJURY

MOTOR
KEY MUSCLES

	R	L
C2		
C3		
C4		
C5		
C6		
C7		
C8		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		
T7		
T8		
T9		
T10		
T11		
T12		
L1		
L2		
L3		
L4		
L5		
S1		
S2		
S3		
S4-5		

Elbow flexors
Wrist extensors
Elbow extensors
Finger flexors (distal phalanx of middle finger)
Finger abductors (little finger)

0 = total paralysis
1 = palpable or visible contraction
2 = active movement, gravity eliminated
3 = active movement, against gravity
4 = active movement, against some resistance
5 = active movement, against full resistance
NT = not testable

Hip flexors
Knee extensors
Ankle dorsiflexors
Long toe extensors
Ankle plantar flexors

Voluntary anal contraction (Yes/No)

TOTALS + = MOTOR SCORE
(MAXIMUM) (50) (50) (100)

LIGHT TOUCH
PIN PRICK

	R	L
C2		
C3		
C4		
C5		
C6		
C7		
C8		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		
T7		
T8		
T9		
T10		
T11		
T12		
L1		
L2		
L3		
L4		
L5		
S1		
S2		
S3		
S4-5		

0 = absent
1 = impaired
2 = normal
NT = not testable

Any anal sensation (Yes/No)

TOTALS + = PIN PRICK SCORE (max: 112)
(MAXIMUM) (56) (56) (56) (56)

+ = LIGHT TOUCH SCORE (max: 112)

SENSORY
KEY SENSORY POINTS

* Key Sensory Points

NEUROLOGICAL LEVEL <small>The most caudal segment with normal function</small>	SENSORY	R	L	COMPLETE OR INCOMPLETE? <small>Incomplete = Any sensory or motor function in S4-S5.</small>	<input type="checkbox"/>	ZONE OF PARTIAL PRESERVATION <small>Caudal extent of partially innervated segments</small>	SENSORY	R	L
	MOTOR	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		MOTOR	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ASIA IMPAIRMENT SCALE									

This form may be copied freely but should not be altered without permission from the American Spinal Injury Association. 2000 Rev.

Abbildung 10: ASIA - Klassifikation

Bildgebung

Konventionelles Röntgen

Die nativradiologische Untersuchung in zwei Ebenen (a.p. und seitlicher Strahlengang) stellte bei Patienten mit moderater Verletzungsschwere und ohne Beeinträchtigung des Bewusstseins in der Vergangenheit immer Ausgangspunkt der bildgebenden Diagnostik dar. Seit der Einführung und heutzutage nahezu flächendeckenden Verfügbarkeit der Computertomografie, wird in der Literatur das konventionelle Röntgen für die Detektion von Frakturen im Bereich der Wirbelsäule kontrovers diskutiert. Grundlegend sollte bei der Aufnahme eines Röntgenbildes auf eine einwandfreie und standardisierte Durchführung geachtet werden. Bei Frakturen im thorakolumbalen Übergang können Zielaufnahmen die Diagnostik erleichtern und sollten bei Verdacht auch verlangt werden. Bei der Beurteilung sucht man nach möglichen Achsenfehlstellungen, Rotationsfehlern, Krümmungen, Wirbelkörperhöhenminderungen sowie nach verbreiterten Pedikel- und Dornfortsatzabständen. Dabei kann die Qualität der Befundung in den einzelnen Abschnitten, insbesondere jener der Brustwirbelsäule, durch die Überlagerung von Weichteilen beeinträchtigt werden. Hat man eine Fraktur in einem Bereich erfasst, liegen nach Henderson et al. in bis zu 15,2 % der Fälle zusätzliche Frakturen an der Wirbelsäule vor. Demzufolge muss zur Überprüfung immer eine Bildgebung aller drei Abschnitte durchgeführt werden. Zur Beurteilung der Stabilität und der genauen Analyse der Frakturmorphologie reicht ein konventionelles Röntgen aber nicht aus. Untersuchungen von Ballock et al. zeigten, dass nur bei Durchführung eines Nativröntgens rund 20 % der instabilen Berstungsfrakturen als stabile Kompressionsfrakturen fehldiagnostiziert wurden [28,31,32].

Computertomografie

Die Computertomografie (CT) ist in der heutigen Zeit bei der Diagnose von Wirbelsäulenverletzungen nicht mehr wegzudenken und hat die konventionelle Röntgenuntersuchung als Mittel der Wahl bereits teilweise abgelöst. Sie liefert nicht nur innerhalb kürzester Untersuchungszeit und in ausgezeichneter Bildqualität, wichtige Informationen für die Klassifizierung und Therapie einer Fraktur, sondern verschafft auch bei polytraumatisierten PatientInnen schnell

einen Überblick über das Ausmaß der Verletzungen. Wurde primär eine Röntgenuntersuchung durchgeführt, sollte eine zusätzliche CT-Untersuchung dann vorgenommen werden, wenn Unsicherheiten in der Bildbeurteilung, neurologische Ausfälle oder nicht erklärbare Schmerzen vorliegen. Neben der höheren Sensitivität in der Suche nach Frakturen gegenüber dem konventionellen Röntgen, erlaubt die Computertomografie auch Aussagen über den Stabilitätszustand der Wirbelsäule und eine limitierte Befundung der Weichteile. Auch Einengungen des Spinalkanals, etwa durch Verlagerung der Wirbelkörperhinterkante, können ausgemessen und mit benachbarten Segmenten verglichen werden. Ungeachtet aller Vorteile dieser Untersuchungsmethode, gilt es die vergleichbar hohe Strahlenbelastung bei jedem/er Patient/in abzuwägen. Sie erfordert bei Kindern und Jugendlichen eine strenge Indikationsstellung und ist bei Schwangeren kontraindiziert [33-35].

Magnetresonanztomografie

Die Magnetresonanztomografie (MRT) spielt in der Akutdiagnostik kaum eine Rolle und ist nur speziellen Fragestellungen vorenthalten. Durch den hohen Weichteilkontrast ermöglicht sie eine gute Beurteilung der neuronalen und ligamentären Elemente. Sie ist dann erforderlich, wenn trotz unauffälliger CT-Untersuchung neurologische Ausfälle bestehen oder schwerwiegende Verletzungen, welche mit Läsionen des vorderen oder hinteren Bandkomplexes einhergehen, vorliegen. Auch bei der Diagnose von Bandscheibenverletzungen oder zur Einschätzung des Alters osteoporotisch bedingter Frakturen, kann die MRT-Untersuchung hilfreich sein. Als nachteilig hat sich die lange Untersuchungszeit erwiesen, die routinemäßig 15 bis 20 Minuten beträgt. Hinzu kommt, dass sich die PatientInnen in der Zeit so wenig wie möglich in der engen Röhre bewegen sollen, was in akuten Schmerzsituationen und bei bestehender Klaustrophobie oft nur mit entsprechender Sedierung zumutbar ist [25,28,34,35].

1.4 Therapie

Im nachfolgenden Abschnitt wird, aus Gründen der Relevanz, nur auf die Therapie der Typ A-Verletzungen eingegangen.

Die grundlegenden Ziele bei der Behandlung von Wirbelsäulenverletzungen sind das Erreichen von Stabilität, die Wiederherstellung und Aufrechterhaltung des Alignments der Wirbelsäule, der Schutz neuraler Strukturen und die bestmögliche Vermeidung von Langzeitschmerzen. Auch die frühestmögliche Mobilisation und damit schnelle Wiedereingliederung in den Alltag zum Erhalt der Lebensqualität, sollten während der Erreichung der Ziele bedacht werden [36,37].

Auch heute noch wird die Behandlung thorakolumbaler Frakturen hinsichtlich konservativer oder operativer Therapie unverändert kontrovers diskutiert, auch die Auswahl des optimalen Operationsverfahrens, unter Berücksichtigung des jeweiligen Verletzungsmusters und des Patientenzustandes, stellt die moderne Wirbelsäulenchirurgie vor eine große Herausforderung. In der Literatur gibt es nach wie vor unterschiedliche Meinungen, wann eine Fraktur als stabil bzw. instabil einzustufen ist.

Nach der aktuellsten Klassifikation der AOSpine Arbeitsgruppe sieht man für Typ A - Verletzungen folgende Therapieschemata vor: Frakturen des ersten Subtyps (A0) unterliegen der rein konservativen Therapie, da eine Verletzung von stabilitätsrelevanten Strukturen nicht vorliegt. A1 Verletzungen werden in der Mehrheit der Fälle konservativ behandelt, da die Hinterkante des Wirbelkörpers intakt bleibt. Bei ausgeprägten Kompressionszuständen mit einhergehender kyphotischer Deformität kann jedoch eine operative Therapie in Frage kommen. Brüche der Untergruppe A2 neigen, je nach Verletzungsschwere, zu späterer Bildung einer Kyphose oder Pseudoarthrose und werden daher in der Mehrheit der Fälle operativ behandelt. Berstungsfrakturen (Typ A3 und A4) stellen im deutschsprachigen Raum die Domäne der operativen Therapie dar, allerdings kann bei der inkompletten Form (A3) ohne wesentliche Dislokation der Hinterkante und bei vollkommenem Erhalt der neurologischen Funktionen, ein konservativer

Therapieansatz versucht werden. Kommt es dabei zu keiner Besserung der Beschwerdesymptomatik oder tritt im Rahmen der Kontrolle ein nachträglicher Korrekturverlust auf, kann ein sekundär operativer Eingriff erforderlich werden [38].

1.4.1 Konservative Therapie

Bis vor wenigen Jahren erfolgte die konservative Therapie von thorakolumbalen Wirbelsäulen nach dem Prinzip "Einrichten, Ruhigstellen und Üben" von Lorenz Böhler, das heute noch bei Knochenbrüchen in anderen anatomischen Regionen verwendet wird. Hierzu erfolgt zunächst im dorsalen Aushang unter Längszug an Schultergürtel und unterer Extremität die Reposition. Dies ist sehr gut auf einem Extensionstisch mit Lordosierungsmöglichkeit durchführbar. In dieser Stellung (idealerweise unter Bildverstärker-Kontrolle) wird ein Mieder aus Gips anmodelliert, welches für mindestens 12 Wochen und maximal für fünf Monate zur Retention der Fraktur getragen werden muss. Begleitend wird so früh wie möglich, am besten noch am Tag der Reposition, mit einer konsequenten Übungsbehandlung begonnen, die auch nach Abnahme des Mieders fortgeführt werden sollte. Die Behandlung erfordert regelmäßige Röntgen- und Miederkontrollen um Repositionsverluste frühzeitig erkennen zu können und dabei eventuell zu Bruch gegangene Mieder austauschen zu können. Dieses Verfahren unterliegt jedoch gewissen Voraussetzungen. Es sollte nur bei rein knöchernen Verletzungen angewendet werden und die Verletzung darf nicht länger als 10 Tage zurückliegen. Frakturen, die sich nicht reponieren lassen, Adipositas, lokale Hauterkrankungen sowie ein schlechter Allgemeinzustand und mangelnde Compliance des Patienten stellen Kontraindikationen für diese Art der Behandlung dar [25,39].

Die konservative Behandlung nach Böhler wird heutzutage im deutschsprachigen Raum nur mehr selten durchgeführt. Alternativ wurde von Magnus eine funktionelle Therapie vorgeschlagen. Magnus erkannte bereits 1930, dass die Mehrheit der Frakturen nach Einrichtung und anschließender Ruhigstellung wieder in die ursprüngliche Stellung zusammensinterten und verzichtete daher grundlegend auf eine Reposition. Seitdem wurde die Therapie in regelmäßigen Abständen modifiziert und weiterentwickelt. Bei der heutigen konservativen

Therapiemethode wird der/die Patient/in in der ersten Phase der Behandlung flach auf dem Rücken gelagert und eine Basistherapie mit physiotherapeutischen Atemübungen und aktiven Bewegungen der Extremitäten begonnen. Nach Rückgang der Beschwerden unter Zuhilfenahme von Analgetika, kann mit dem Training der Rückenmuskulatur begonnen werden. Bereits nach einigen Tagen kann das Training in Bauch- und Seitenlage intensiviert werden, bevor erste Versuche zur vollen Mobilisierung im Bewegungsbad durchgeführt werden können. Ab dem Zeitpunkt der Vollmobilisierung kann ein Mieder zur Hilfe genommen werden. Dieses limitiert einerseits Ausmaß und Richtung der Bewegung und soll auf der anderen Seite einen Erinnerungseffekt zur Einnahme einer aufrechten Körperhaltung haben. Heutzutage steht eine breite Palette an Orthesen zur Verfügung, die auf das jeweilige Frakturgebiet spezialisiert sind. PatientInnen bleiben in der Regel 1 - 3 Wochen zur stationären Behandlung, bevor eine ambulante Physiotherapie für weitere 3 - 4 Monate fortgeführt wird. Von Beginn an sollte die Therapie von engmaschigen radiologischen Kontrollen begleitet werden, um eine weitere zunehmende Deformierung frühzeitig erkennen zu können. Verlaufskontrollen werden nach erfolgter Mobilisation und in weiterer Folge nach 2 bis 4 Wochen sowie nach 3 und 6 Monaten angefertigt. Mit eigenständigen Bewegungsübungen, die im speziellen die Wirbelsäule mobilisieren, sollte erst nach der ambulanten Therapieperiode begonnen werden [25,39,40].

Nachteil der konservativen Behandlung ist die regelhafte Zunahme der Deformität des Wirbelkörpers sowie die nicht verhinderbare sekundäre Kyphosierung. Reinhold et al. zeigten anhand einer retrospektiven Studie an 43 PatientInnen mit A und B - Verletzung (nach der AO Klassifikation), dass nach 16 Jahren im Durchschnitt die Kyphosierung um 5,2 Grad gegenüber des Unfallzeitpunktes zunahm. Ein Korrekturverlust im Röntgenbild korreliert aber nicht dem funktionellem Ergebnis [41]. Zu einem ähnlichem Resultat kamen auch Chow et al., die insgesamt 24 Patienten nachuntersuchten. Dabei kam es nach einem Jahr, verglichen mit den Daten zum Zeitpunkt des Traumas, zu einer Zunahme der Kyphose um 2,3 Grad, der Wirbelkörper sinterte um weitere 10,7 % nach. Auch in dieser Studie konnte kein Zusammenhang zwischen radiologischem Ergebnis und funktionellem Outcome gefunden werden [42].

Rajasekaran führte 2009 eine Literaturrecherche durch und analysierte insgesamt 8 Studien, in denen PatientInnen mit Berstungsfrakturen konservativ behandelt wurden. Auch hier konnte eine Zunahme der kyphotischen Deformität von 1 bis 6 Grad festgestellt werden. Bei rund 10 % der PatientInnen wirkte sich die posttraumatische Kyphose entscheidend auf die Lebensqualität aus [43].

1.4.2 Operative Therapie

Die operativen Behandlungsmöglichkeiten für Frakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule haben sich in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt. Dabei haben neue Zugangswege, optimierte Operationsverfahren aber auch neue Designs bei den Implantaten, die Möglichkeiten der Wirbelsäulen Chirurgie erweitert. Ziel jeder operativen Therapie ist es, eine Reposition der frakturbedingten Fehlstellung durchzuführen, eventuelle Einengungen des Spinalkanals zu beheben und das Retentionsergebnis langfristig zu erhalten. Wenn auch letzteres sich – abhängig von Studiendesigns und Frakturformen – in der Literatur nicht deutlich von der konservativen Therapie unterscheidet, hat die operative Methode doch auch relevante Vorteile gegenüber der konservativen Therapie. So können PatientInnen nach der Operation sofort mobilisiert werden und in weiterer Folge früher mit der Rehabilitation beginnen. Auch PatientInnen mit mehreren Verletzungen oder solche, bei denen eine Kontraindikation für eine frühfunktionelle Behandlung besteht, können von einer operativen Therapie profitieren. Andererseits müssen die Komplikationen und Risiken eines chirurgischen Eingriffes individuell genau abgewogen werden.

Bei den operativen Möglichkeiten der Fraktur stabilisierung unterscheidet man zwischen dorsalen, ventralen und kombiniert dorsoventralen Verfahren [25].

Die operative Therapie instabiler Berstungs- und Kompressionsverletzungen wird kontrovers diskutiert. Ein häufig verwendetes Verfahren zur Reposition der Fehlstellung und Dekompression des Spinalkanals ist die dorsale Instrumentierung. Die Korrektur der Wirbelkörperhöhe und des kyphotisch frakturierten Wirbelkörpers gelingt primär oft gut durch Bauchlage, Ligamentotaxis und alleiniger dorsaler Instrumentierung mit Repositionstools und zum Teil monoaxialen Schrauben. Studien belegen jedoch bei einem Großteil der Fälle

einen signifikanten Verlust der Reposition, da bei isolierter dorsaler Operationstechnik die vordere Säule nicht ausreichend stabilisiert werden kann [44-47]. Auch können zentralere Frakturfragmente durch Ligamentotaxis nicht adäquat reponiert werden. Ventrale Verfahren zur Rekonstruktion wurden in der Vergangenheit aufgrund der Invasivität und der damit verbundenen erheblichen Morbidität restriktiv angewendet. Obwohl mittlerweile endoskopisch gestützte Verfahren angewendet werden, ist die Versorgung der ventralen Säule ein anspruchsvoller und komplexer Eingriff, der nach wie vor mit vielen Komplikationen behaftet ist. Daniaux stellte 1986 zur Stabilisierung der vorderen Säule erstmals ein Verfahren über den dorsalen Zugangsweg vor. Hierfür wird zusätzlich zur dorsalen Instrumentierung der Wirbelkörper transpedikulär mittels autologer Spongiosaplastik aufgefüllt [48]. Experimentelle und klinische Untersuchungen konnten jedoch ein Versagen der Spongiosaplastik mit signifikantem Korrekturverlust nachweisen [49-51].

Basierend auf der Erkenntnis von Daniaux den Wirbelkörper über den dorsalen Zugang aufzurichten, versuchten Toyone et al. 2007 die vordere Säule mittels transpedikulär platzierten Hydroxyapatitzylindern zu stabilisieren. Die Analyse radiologischer Bilder zeigten, sowohl postoperativ als auch bei den Untersuchungen nach Entfernung der Pedikelschrauben gute Ergebnisse [52].

Mit der Einführung minimalinvasiver Techniken zur Segmentstabilisierung und Wirbelkörperaugmentation hat sich das Behandlungsspektrum von Wirbelsäulenfrakturen rasant weiterentwickelt. Während das Verfahren der Kyphoplastie anfangs nur bei osteoporotisch bedingten Brüchen der Wirbelsäule durchgeführt wurde, fand es in den letzten Jahren auch im Bereich traumatischer Frakturen eine zunehmende Anwendung. Vor allem bei jungen Patienten mit Kompressions- und Berstungsfrakturen zeigt die einzeitige, minimalinvasive Operation mittels Ballonkyphoplastie und perkutaner dorsaler Stabilisierung bereits gute Studienergebnisse. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren an der Grazer Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie seit einigen Jahren angewendet und favorisiert.

Da es sich in dieser Studie um PatientInnen handelt, die mit einem Hybridverfahren, bestehend aus Kyphoplastie und perkutaner dorsaler

Stabilisierung, behandelt wurden, werden im folgenden Abschnitt allgemeine Informationen über beide Operationstechniken gesondert vermittelt. Die Beschreibung der Operationsdurchführung erfolgt im Anschluss aber gemeinsam.

1.4.2.1 Minimalinvasive Zementaugmentationsstechniken

Die Traumatologie erfuhr seit der Jahrtausendwende vor allem Entwicklungen im Bereich der minimalinvasiven Operationsmethoden. Gründe dafür sind die erhebliche Reduktion des chirurgischen Traumas mit signifikanter Reduktion des Blutverlustes und die deutliche Verkürzung der Operationsdauer gegenüber den klassischen offenen Techniken. Durch die kleineren Schnitte werden postoperative Wundheilungsstörungen seltener, PatientInnen leiden nach den Operationen weniger an Schmerzen und können daher auch früher mobilisiert werden [53]. Galibert et al. beschrieben 1984 erstmals die Technik der minimalinvasiven Augmentation mittels Zement und nutzten sie zur Behandlung eines Hämangioms im Wirbelkörper. Die so genannte Vertebroplastie sollte dabei eine Alternative zum offenen Vorgehen darstellen, mit dem Ziel, die Schädigung der Weichteile und der Muskulatur zu reduzieren. Dabei spritzten die Autoren unter hohem Druck über einen perkutanen transpedikulären Zugang, Polymethylmethacrylat-Zement (PMMA) direkt in den Wirbelkörper. Kurze Zeit später wurde dieses Verfahren auch zur Defektfüllung pathologischer Osteolysen verwendet, bevor es anschließend 1994 für die Therapie osteoporotischer Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule ausgeweitet wurde [54,55].

Trotz der primär guten Stabilisierungsergebnisse mit unmittelbarer Reduktion der Schmerzsymptomatik bis hin zur kompletten Schmerzfreiheit nach dem Eingriff, sorgt die Vertebroplastie für Diskussionen. Grund ist der hohe Druck, der für die Injektion der Zementmasse benötigt wird und der damit verbundenen Komplikation des Zementaustrittes in benachbarte Strukturen [56].

Ende der 90er Jahre erfolgte mit der Einführung der Kyphoplastie die Weiterentwicklung der Vertebroplastie, die gezielt für den Einsatz von osteoporotisch bedingten Frakturen bestimmt war. Im Gegensatz zur oben genannten Methode erlaubt die Kyphoplastie neben der Stabilisierung durch den Zement auch erstmals eine Aufrichtung der Fraktur in die ursprüngliche Form.

Hierfür wird mittels Ballons, die nach Positionierung im Wirbelkörper mit kontrastgebender Flüssigkeit aufgeblasen werden, ein Hohlraum im Inneren des Wirbelkörpers erzeugt. Anschließend erfolgt in diese geschaffene Cavität die Applikation des Zementes mit deutlich geringeren Drücken als bei der Vertebroplastie. Durch diese Technik wird somit auch das Risiko einer Zementleckage verringert. Mark Reiley führte 1998 die erste Anwendung am Patienten durch, nachdem das Verfahren in Amerika durch die FDA zugelassen wurde [57].

1.4.2.2 Minimalinvasive dorsale Stabilisierung

Auch im Bereich der dorsalen Stabilisierungssysteme wurden in der Vergangenheit verschiedene Systeme angewandt und weiterentwickelt. Obwohl sich perkutane Techniken bereits seit einigen Jahren auf dem Markt befinden, waren sie überwiegend für den Einsatz im orthopädisch/degenerativen Bereich spezialisiert, da sie den Anforderungen in der Unfallchirurgie zur suffizienten Frakturaufrichtung nicht gerecht wurden. Aufgrund der eingeschränkten aktiven Repositions- und Distraktionsmöglichkeiten der perkutanen Methoden wurden die offenen Systeme deshalb bei instabilen Frakturen mit erheblicher posttraumatischer Fehlstellung favorisiert. Dabei wurden die längeren Operationszeiten, der erhöhte Blutverlust und Gewebeschaden und die signifikant höhere postoperative Morbidität gegenüber der minimalinvasiven Technik zugunsten des Repositionsergebnisses in Kauf genommen. Neueste perkutane Systeme ermöglichen nun mittels Repositionshilfen und monoaxialen Schrauben auch bei hochgradiger kyphotischer Fehlstellung, eine aktive Reposition und verbinden so die Vorteile der perkutanen und offenen Stabilisierungsverfahren. Durch die ständige Verbesserung der Implantate zeichnet sich in der heutigen Zeit ein Trend zur perkutanen Frakturversorgung im Bereich der Wirbelsäule ab. Perkutane Techniken sind in ihrer Anwendung limitiert und können nur bei PatientInnen ohne neurologischer Ausfallsymptomatik mit geringer Einengung des Spinalkanals ($<1/3$) durchgeführt werden, da adäquate Dekompressionen nur mittels offener Operationstechnik möglich sind [58,59].

Technik der Hybridoperation

Die Überlegung der kombinierten Verfahren ist, dass die alleinige Kyphoplastie nicht in der Lage ist die Hinterkante des Wirbelkörpers ausreichend zu fixieren und die dorsale Spondylodese die ventrale Säule nicht aufrichten und stabilisieren kann. Sind sowohl vordere als auch hintere Säule verletzt, sorgt weder die isolierte dorsale Stabilisierung, noch die Kyphoplastie für ein gutes Ergebnis [60].

Indikation

Die Problematik bei der operativen Therapie von Frakturen im thorakalen und lumbalen Bereich ist, dass aktuelle Empfehlungen nur auf eine von Expertenwissen aufgebaute Behandlungsbasis existieren. Aufgrund der nach wie vor unzureichenden Studienlage dieses neuen Behandlungsverfahrens existieren keine Leitlinien, die eine eindeutige Indikationsstellung erlauben würden.

Nach Durchsicht der aktuell vorhandenen Publikationen, wurde die Kombination aus Kyphoplastie und perkutaner dorsaler Stabilisierung für instabile Frakturen traumatischer oder osteoporotischer Genese ohne neurologischer Symptomatik verwendet, bei denen eine alleinige dorsale Stabilisierung nicht ausreichen würde.

Operationstechnik:

Die Hybridtechnik wird in der Regel unter Allgemeinnarkose durchgeführt, um eine ausreichende Relaxation der Rückenmuskulatur zu gewährleisten. Nach Einleitung der Narkose wird der/die Patient/in in Bauchlage am Operationstisch gelagert und eine geschlossene Reposition mittels manuellem axialen Längszug und Hyperlordosierung ausgeführt. Die anschließende Lagerung auf speziellen Kissen im Bereich des Beckens und der Brust sorgt für eine anhaltende lordotische Stellung der Lendenwirbelsäule und schützt vor Lagerungsschäden. Diese spezielle Lagerung erleichtert die spätere Reposition und kann zusätzlich bereits vor Beginn der Operation eine partielle Aufrichtung des Wirbelkörpers bei frischen Frakturen bewirken.

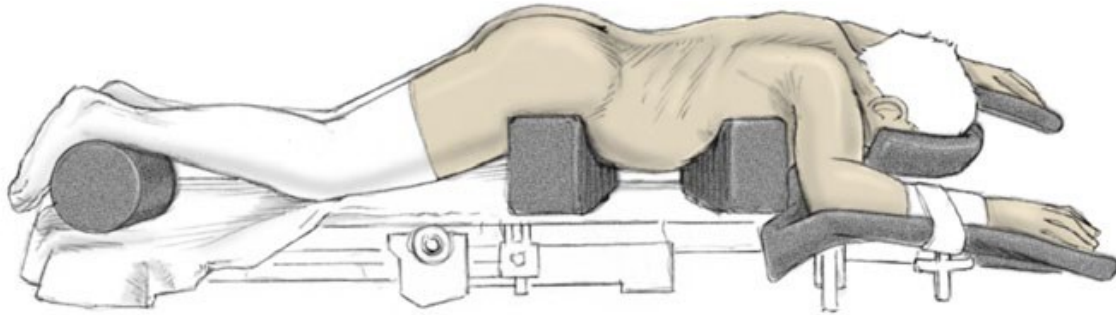


Abbildung 11: Operative Lagerung

Da bei den perkutanen Techniken keine direkte Sicht auf die zu operierenden Strukturen möglich ist, werden zwei schwenkbare C-bogenförmige Bildwandler zur röntgenologischen Kontrolle in anteriorem-posteriorem und seitlichem Strahlengang benötigt. Mit den Bildwandlern wird der frakturierte Wirbelkörper eingestellt und die Pedikel, welche zugleich den späteren Zugang darstellen, auf der Hautoberfläche markiert. Die Vorbereitungen werden mit der chirurgischen Hautdesinfektion und der sterilen Abdeckung des Operationsgebietes beendet.

Je nach Lokalisation der Fraktur unterscheidet man zwischen einem transpedikulären und extrapedikulären Zugang. Der transpedikuläre Zugang stellt das Standardverfahren bei Brüchen im Bereich der Lendenwirbelsäule und der unteren Brustwirbelsäule dar, weil sich die Pedikel in der Regel gut voneinander differenzieren lassen und sie eine ausreichende Positionierung der Arbeitsgeräte erlauben. Kranial der mittleren Brustwirbelsäule werden die Pedikel zunehmend schmaler und konvergieren nicht mehr so stark, sodass hier das vordere Drittel des Wirbelkörpers mit den Instrumenten über diesen Zugang nicht mehr erreicht werden kann. Deshalb kommt in solchen Fällen der extrapedikuläre Zugang zur Anwendung.

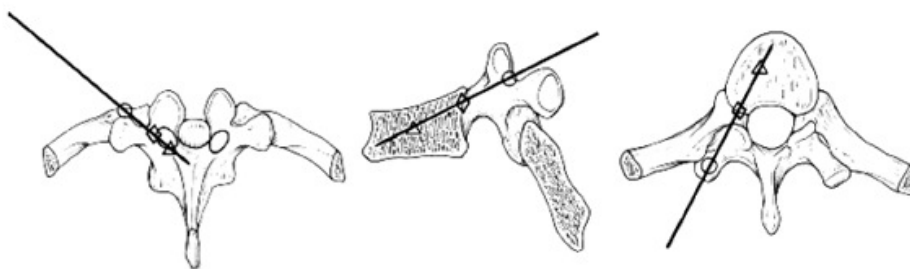


Abbildung 12: Extrapedikulärer Zugang

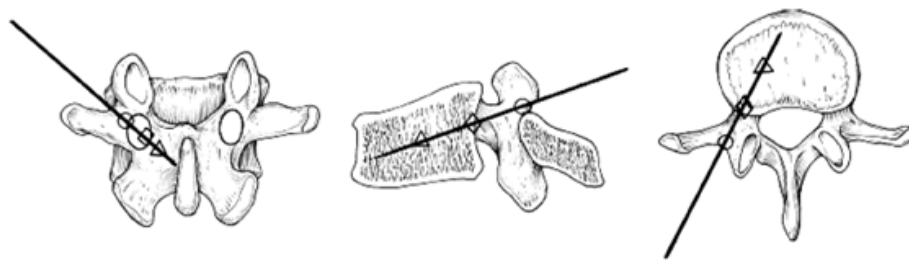


Abbildung 13: Transpedikulärer Zugang

Demnach erfolgt die Stichinzision bei Operationen im Lendenbereich lateral der Pedikelbegrenzung und im oberen Thorakalgebiet etwas lateral und oberhalb des Processus transversus. Die nachfolgenden Schritte sind für beide Seiten ident und erfolgen, je nach Operationsteam, entweder parallel oder hintereinander. Auf Höhe des frakturierten Wirbels wird die Jamshidi-Nadel unter radiologischer Kontrolle mit dem Hammer zuerst wenige Millimeter in den Pedikel eingebracht. Ist die Lage der Punktionshohlnadel mittels Bildwandler korrekt, wird sie vorsichtig bis an die Hinterwand des Wirbelkörpers vorgeschoben. Nach Durchbrechung der Wirbelkörperhinterwand wird über die Hohlnadel ein Kirschnerdraht zum Sondieren der Vorderkante eingeführt und anschließend wieder entfernt. Bevor die Kyphoplastie am frakturierten Wirbel fortgesetzt wird, werden weitere Führungsdrähte in den beiden benachbarten kranialen und kaudalen Wirbelkörpern eingesetzt, sodass am Ende der Pedikulierung insgesamt 4 Führungsdrähte in den 2 benachbarten Wirbelkörpern und 2 Kyphoplastie- mandrins zu liegen kommen. Die vier zusätzlichen Führungsdrähte dienen als Schienung für die kanülierten Pedikelschrauben der dorsalen Stabilisierung und sollten im ventralen Drittel des Wirbelkörpers, parallel zur Deckplatte, zum Liegen kommen.

Nun wird über die Kyphoplastiearbeitskanüle mittels Bohrer und Kürette ein Hohlraum im Wirbelkörper geschaffen. Anschließend wird ein ausreichend großer Ballon beidseits eingeführt. Wichtig ist, dass sich die Markierungen beider Ballone außerhalb der Arbeitskanülen befinden, die Kyphoplastieballone sollten dabei idealerweise in der Mitte des Wirbelkörpers liegen. Danach erfolgt, unter radiologischer und manometrischer Kontrolle, das schrittweise Auffüllen der Ballone mit jodhaltigem Kontrastmittel, wobei je nach Knochenqualität ein entsprechend hoher Druck notwendig ist, um die Wirbelkörper aufzurichten. Im Schnitt sind pro Wirbelkörper und Seite ca. 2,5-4 ml Ballonfüllung notwendig. Die

Inflation erfolgt unter Betrachtung der Fraktur im seitlichen und a.p.-Strahlengang und ist beendet, wenn einer von folgenden drei Faktoren eingetreten ist. Mögliche Endpunkte stellen dabei das Erreichen des Maximalvolumens, das Erreichen des größtmöglichen Drucks oder das Berühren der Kortikalis des Wirbelkörpers dar. Bevor die Ballone wieder entleert und entfernt werden, wird das applizierte Füllvolumen an den Druckspritzen der Ballons abgelesen. Unmittelbar daran schließt sich die Augmentierungsphase an und der Knochenzement wird in die zuvor geschaffenen Hohlräume mit speziellen Kanülen (sog. Bonefiller) injiziert. Auch dieser Vorgang soll in kleinen Schritten und unter Zuhilfenahme des Bildwandlers erfolgen, um auf einen möglichen Zementaustritt schnell reagieren zu können. Die Arbeitskanülen werden bis zur Aushärtung des Zementes belassen, damit ein Zurückfließen in Richtung der Zugangswege verhindert werden kann. Der erste Teil der Operation ist mit dem Wundverschluss der beiden Stichinzisionen beendet.

Der zweite Teil sieht nun die Implantation der dorsalen Stabilisierung vor und erfolgt über die zuvor gesetzten Führungsdrähte. Um später die Schrauben ohne Verletzung der Weichteile einbringen zu können, müssen Muskeln und Faszie stumpf dilatiert werden. Hierfür werden nacheinander drei Dilatoren mit ansteigendem Durchmesser über die Führungsdrähte geschoben und die beiden innen liegenden Dilatoren wieder entfernt. Die anschließende Präparation des Pedikels gelingt nun ohne zusätzliches Trauma mittels Gewindeschneider, der ebenfalls über den Führungsdraht eingebracht wird. Die korrekte Schraubenlänge wird nun durch Ausmessen des Gewindekanals ermittelt und die jeweiligen Schrauben für die anstehende Implantation vorbereitet, indem am Kopf der Schrauben eine Verlängerung zur sicheren Führung während des Einbringens montiert wird. Nun werden die genannten Schritte an den übrigen drei Pedikeln wiederholt.

Nacheinander werden nun die Schrauben über die verbliebenen Führungsdrähte in den Kanälen platziert und unter fluoroskopischer Kontrolle festgezogen. Die Verlängerungen an den Schraubenköpfen bleiben noch befestigt, da sie für die Einführung der Längsstäbe und der abschließenden Feinjustierung der Reposition benötigt werden. Nach Bestimmung der Länge der beiden Längsstäbe unter Zuhilfenahme des Messzirkels, werden sie entsprechend der Krümmung des versorgten Wirbelsäulenabschnittes gebogen und am sextantförmigen

Stabeinführungsinstrument befestigt. Die Krümmung des Stabes bestimmt dabei die Aufrichtung in der Sagittalebene wenn monoaxiale Schrauben verwendet werden. Bei polyaxialen Schrauben gelingt über die Stabbiegung keine weitere Reposition. Die zwei Schrauben an der ipsilateralen Seite werden nun durch die Verlängerungen manuell in eine Linie gebracht und der Längsstab mit dem Sextanten über eine kraniale Stichinzision oder durch Schnitterweiterung durch die Schraubenköpfe geführt. Zur Sicherung des Stabes werden Verschlusschrauben in die Schraubentulpen eingeführt und mit dem Drehmomentschraubenzieher festgezogen. Bei Verwendung von polyaxialen Schrauben kann durch spezielle Instrumente über die Schraubenhülsen noch eine weitere Reposition erreicht werden. Die Instrumente werden entfernt und das Vorgehen an der Gegenseite wiederholt. Zum Schluss erfolgen eine letzte radiologische Kontrolle und der Wundverschluss der Stichinzisionen.

[58,61-64]

Nachbehandlung

Durch die belastungsstabile Instrumentierung können die PatientInnen bereits am nächsten Tag mit der physiotherapeutischen Beübung und Rückenschulung beginnen. Ein postoperatives Röntgenbild in zwei Ebenen wird in der Regel am ersten Tag nach der Operation angefertigt. Patienten können im Durchschnitt am 2.-5. postoperativen Tag das Krankenhaus verlassen, eine anschließende Rehabilitation ist für den Großteil der PatientInnen nicht notwendig. Die Fortführung einer ambulanten Physiotherapie zur Stärkung der Rückenmuskulatur wird aber dringend empfohlen. Die erste klinische und radiologische Kontrolle mit Nahtentfernung findet nach rund 14 Tagen statt. Weitere Verlaufskontrollen erfolgen nach einem, drei und sechs Monaten. Klagt der Patient über eine neu aufgetretene Neurologie oder besteht der Verdacht auf eine Schraubenfehlage oder einem Repositionsverlust, sollte immer eine Computertomografie durchgeführt werden. Die Metallentfernung erfolgt standardmäßig nach 6-12 Monaten.

Komplikationen

Neben den allgemeinen Risiken, die bei jedem operativen Eingriff auftreten können, gibt es für die Kyphoplastie und der perkutanen dorsalen Stabilisierung

spezifische Komplikationen, worauf im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

Kyphoplastie

Die am häufigsten dokumentierte Komplikation der Kyphoplastie ist der Austritt des Zementes aus dem Wirbelkörper. In der Literatur werden bei der Kyphoplastie Extrusionsraten von 5 - 40 % beschrieben, bei der Vertebroplastie hingegen ist von bis zu 70 % der Fälle die Rede. Die deutlich geringeren Raten bei der Kyphoplastie lassen sich dadurch erklären, dass beim Aufblasen der Ballone eine Art Verzahnung der äußeren Ränder des Wirbelkörpers entsteht, die eine Abgrenzung nach außen hin ermöglicht. Des Weiteren wird im Vergleich zur Vertebroplastie ein deutlich geringerer Druck zur Applizierung des Zementes benötigt, auch der eingebrachte Zement ist bei der Kyphoplastie um einiges zähflüssiger. Mögliche Ursachen für den Austritt des Zementes kann ein zu flüssiger Zement, ein zu hoher Applizierungsdruck oder auch eine schlechte Bildgebung und Ungeduld des Operateurs während der Injektionsphase sein. Obgleich dieses hohen Anteils an Leckagen, bleibt die Mehrheit der Fälle asymptomatisch. Dennoch können mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,3 - 1,6 % Zementaustritte mit neurologischen und pulmonalen Komplikationen auftreten. Besonders gefährlich sind in diesem Zusammenhang auftretende Lungenembolien durch Verschleppung des Zementes in Gefäße oder auch Austritte in Richtung des Spinalkanals oder der Neuroforamina.

Weitere Komplikationen können beim fluoroskopisch kontrollierten Instrumentieren der Pedikel auftreten. Eine Fehlpunktion kann zur Durchbrechung des Spinalkanals mit Verletzung neurologischer Strukturen führen, ein Abweichen nach lateral kann mit Perforationen der Lunge bzw. der Abdominalorgane einhergehen. Schiebt man die Hohlneedle hingegen über die ventrale Wirbelkante hinaus, kann es zu Läsionen großer Blutgefäße kommen. Trotz allem tritt eine Verletzung benachbarter Strukturen durch Fehlpunktion in unter 1 % der Fälle auf. Ein weiteres Problem stellen Anschlussfrakturen dar, welche nach Durchführung der Kyphoplastie entstehen können. Sie sind definiert als eine neu aufgetretene Kompressionsfraktur, die sich entweder direkt kranial oder kaudal des zuvor behandelten Wirbelkörpers befindet. Über deren Inzidenz findet man in der Literatur teils sehr variable Zahlen. Pflugmacher et al. belegen, dass die jährliche Rate an Anschlussfrakturen nach Kyphoplastie bei 10 % liegt. Laut Uppin treten

weitere Frakturen an der Wirbelsäule in den ersten drei Monaten nach Intervention auf, davon sind 67 % der Fälle Anschlussfrakturen. Der genaue Entstehungsmechanismus ist aber bis heute noch nicht ausreichend geklärt, jedoch steigt das Risiko mit zunehmendem Body Mass Index (BMI) und mit der Anzahl der kyphoplastierten Wirbelkörper. Auch ein Zusammenhang zwischen Zementaustritt und Anschlussfraktur wird in der Literatur beschrieben. So erlitten 58 % der Patienten eine zusätzliche Fraktur des angrenzenden Wirbelkörpers, wenn Zement in das Bandscheibenfach ausgetreten war.

Generell führt die Zementaugmentation zu Veränderungen der biomechanischen Eigenschaften der Wirbelsäule. Augmentierte Wirbelkörper sind in diesem Bereich signifikant steifer und stärker als normale Knochensubstanz. Dies resultiert in einer Änderung der Lastenverteilung und erhöhter Belastung der benachbarten Segmente und bewirkt letztendlich ein größeres Risiko für Anschlussfrakturen.

[56,62,65-68]

Perkutane dorsale Stabilisierung

Da auch, wie beim Verfahren der Ballonkyphoplastie, die Pedikel mittels Hohnadel punktiert werden müssen, kann es auch hier im Rahmen der Instrumentierung zu Perforationen mit Verletzung von Gefäßstrukturen und Hohlorganen kommen. Ein weiteres Problem stellt die Gefahr der Weichteilquetschung bei unsorgfältiger Pedikelpräparation dar. Weil keine direkte Sicht auf das Operationsgebiet besteht, kann es durch die scharfen Gewindegänge der Schrauben oder der stumpfen Instrumente zu Läsionen der umliegenden Weichteile kommen. Eine weitere, wichtige Komplikation ist die Fehllage der Pedikelschrauben, die, trotz genauer Kontrolle durch den Bildwandler, bei der Implantation auftreten kann. Bleibt diese während der Operation unbemerkt, kann der Halt im Wirbelkörper nicht gewährleistet werden. Zudem kann es bei Perforation des Wirbelkörpers oder der Pedikelwand wiederum zu Läsionen benachbarter Strukturen kommen.

Eine gefürchtete Komplikation bei jeder Implantation eines Metalls stellt die postoperative Infektion dar. Sie gliedert sich in einen unmittelbar nach der Operation auftretenden Frühinfekt und einen Spätinfekt, welcher Wochen bis Monate nach dem Eingriff auftritt. Der Frühinfekt tritt in der Regel noch im Krankenhaus innerhalb der ersten postoperativen Tage auf und äußert sich durch

Fieber, erhöhte Entzündungsmarker im Blutbild, zunehmende Schmerzen und gelegentliche Rötungen über dem Operationsgebiet. Oberstes Ziel ist die Vermeidung einer frühzeitigen Metallentfernung durch Einsatz von Saug- und Spülsystemen und systemischer Antibiose, da die Explantation zu einer erheblichen Instabilität mit Repositionsverlust führt.

[25,58,69]

1.5 Knochenersatzwerkstoffe

In der Orthopädie und Unfallchirurgie wird der Einsatz von Knochentransplantaten und Knochenersatzmaterialien benötigt, um bestehende Knochendefekte behandeln und damit Verletzungen zeitgerecht heilen zu können. Dabei ist die Entnahme von autogenem Knochenmaterial aus dem Beckenkamm nach wie vor der Goldstandard. Knochenersatzmaterialien wurden entwickelt, um die Spongiosaplastik zu ergänzen oder zu ersetzen, da jede Entnahme aus dem Knochen mit einer gewissen Morbidität verbunden ist.

Knochenersatzwerkstoffe haben nach Implantation die Aufgabe, strukturelle Elemente und deren Funktion zu ersetzen und entweder alleine oder zusammen mit anderen Materialien den Prozess der Knochenneubildung und letztendlich dessen Heilung zu fördern. Die ausreichende Verfügbarkeit ohne zusätzliches Entnahmerisiko ist ein entscheidender Vorteil gegenüber der autogenen Spongiosatransplantation.

Knochenersatzmaterialien gehören zur Gruppe der Biomaterialien und werden anhand ihrer biologischen Eigenschaften in drei Gruppen eingeteilt:

Osteogenese:

Diese Materialien sind in der Lage, selbstständig Knochensubstanz zu bilden. Damit dieser Prozess ablaufen kann, müssen die Materialien vitale Zellen beinhalten, die entweder eigenständig Substanz aufbauen können oder sich in knochenbildende Zellen (osteoblastäre Zellen, Stammzellen) differenzieren können

Osteoinduktion:

Osteoinduktion beschreibt die Fähigkeit, die Knochenbildung zu stimulieren und zu fördern. Hierfür enthalten die Materialien bestimmte Wachstumsfaktoren, welche die Differenzierung und das Wachstum osteogener Zellen am Ort der Implantation fördern.

Osteokonduktion:

Osteokonduktive Materialien sind aus bestimmten chemischen Stoffen zusammengesetzt oder bestehen aus speziellen Oberflächen und erlauben somit direkt auf ihnen das Knochenwachstum. Es ist nicht eindeutig geklärt, ob diese Stoffe selbst Knochenbildung induzieren können oder ob sie lokal vorhandene

oder im Blut enthaltende osteoinduktive Wachstumsfaktoren in sich aufnehmen und hierdurch die Fähigkeit erlangen.

[65,70,71]

Während die autogenen Knochentransplantate alle drei Eigenschaften besitzen, können Knochenersatzwerkstoffe nur jeweils eine Eigenschaft einnehmen. Die meisten Materialien besitzen dabei osteokonduktive Eigenschaften und werden synthetisch hergestellt. Bei der Auswahl des Materials zur klinischen Anwendung spielt, neben den biologischen Eigenschaften, auch die Resorbierbarkeit und die mechanische Stabilität eine entscheidende Rolle. Idealerweise sollten die Resorption des Materials und der Aufbau des Knochens parallel und in der gleichen Geschwindigkeit erfolgen. Bei Einsatz des Knochenersatzstoffes in Gebieten mit hoher mechanischer Belastung, muss auf eine entsprechende Stabilität des Produktes geachtet werden. Wird das verwendete Material den mechanischen Anforderungen nicht gerecht, kann es zu Nachsinterungen im Frakturgebiet kommen. Andererseits kommen Werkstoffe zur Anwendung, welche um ein Vielfaches fester als normaler Knochen sind und nach Implantation zu einer, über das physiologische Maß hinaus, erhöhten Steifigkeit führen. Um ein Knochenersatzmaterial erfolgreich implantieren zu können, müssen stabile Verhältnisse mit intaktem Weichteilmantel und vitale Knochenenden vorliegen und eine mögliche Infektion ausgeschlossen werden [70,71].

1.5.1 Knochenzemente

In den letzten Jahren wurden zur Wirbelkörperaugmentation standardmäßig Polymethylmethacrylatzemente (PMMA) verwendet. Sie zeigten zuvor schon in der Endoprothetik und Tumorchirurgie gute klinische Erfahrungen, sind leicht anzuwenden und im Vergleich zu anderen Materialien relativ kostengünstig. Dennoch weisen PMMA-Zemente zwei deutliche Nachteile auf, die es zu berücksichtigen gilt. Ein Problem ist die Hitzeentwicklung, die im Rahmen des Aushärtungsprozesses stattfindet und laut Studien bis zu 60 Grad betragen kann. Folglich kann es dabei zu einer thermischen Schädigung des benachbarten Gewebes kommen und im Falle einer Extrusion des Zementes zu gravierenden

Folgen kommen. Ein weiterer Nachteil zeigt sich im biologischen Verhalten des Zementes, wodurch es bei einem unvollständigen Polymerisationsprozess zum Verbleib von toxischen Monomeren und damit verbunden, zum Auftreten von systemischen Nebenwirkungen kommen kann.

Durch die Ausweitung der Kyphoplastietechnik auf junge Patienten mit traumatischen Wirbelkörperfrakturen, hat man in den vergangenen Jahren vermehrt Zementarten auf Calciumphosphatbasis entwickelt, da PMMA-Zemente, aufgrund der oben genannten Nachteile, für diese Patientengruppe nicht geeignet sind. Durch die guten biologischen Eigenschaften werden heutzutage zunehmend Calciumphosphatzemente angewendet.

Man sieht, dass die Wahl des geeigneten Füllmaterials ein wichtiger Aspekt bei der Kyphoplastie ist und dadurch gewisse Anforderungen an das Material erfüllt werden müssen.

Ideale Merkmale eines Knochenersatzmaterials zur Augmentation sind:

- Gute rheologische Eigenschaften zur Injektion des Materials in den Wirbelkörper
- Hohe Röntgenkontrastgebung
- Isothermischer Aushärtungsprozess
- Ausreichende Bearbeitungszeit von rund 10 Minuten
- Biokompatibilität und adäquate Resorptionszeit des Materials
- Ausreichende mechanische Stabilität
- Knochennahe osteokonduktive und ggf. osteoinduktive Eigenschaften

[72]

1.5.1.1 Polymethylmethacrylatzement (PMMA)

Polymethylmethacrylat ist ein universell einsetzbarer Kunststoff und wurde 1902 durch den Chemiker Otto Böhm bekannt. Galibert et al. nutzten PMMA im medizinischen Bereich erstmals im Jahre 1987 zur Stabilisierung eines Wirbelkörperhämangioms. Die Wirbelkörperaugmentation mittels PMMA-Zement wurde anschließend auch auf die Behandlung osteoporotischer Kompressionsfrakturen ausgeweitet und ist auch heute noch bei der Kyphoplastie ein klinisch bewährtes Füllmaterial.

PMMA-Zemente werden als Zweikomponentensysteme angeboten und bestehen aus Pulver und Flüssigkeit. Hauptbestandteil der Pulverkomponente ist PMMA und/oder Methylmethacrylat-(MMA-)Copolymere. Zur Auslösung des Härtungsprozesses befindet sich noch zusätzlich Benzoylperoxid (BPO) im Pulver. Daneben wird bei der Zubereitung rund 30-40 Vol.-% Bariumsulfat oder Zirkondioxid beigemischt, um den Zement röntgendicht zu machen. Die flüssige Phase besteht überwiegend aus MMA und je nach Hersteller, additiv aus weiteren Methacrylsäureestern. Zur späteren Aktivierung enthält die Komponente aromatische Amine, wie z.B. Dimethyl-p-Toluidin (DmpT). Um während der Lagerung eine vorzeitige Polymerisation zu verhindern, wird der Flüssigkeit noch ein Stabilisator zugefügt.

Werden beide Phasen zusammengemischt, kommt es zu einer Redoxreaktion, bei der Radikale erzeugt werden. Die Radikale wiederum setzen eine Polymerisation in Gang, welche die beiden Komponenten zu einer teigartigen Masse verwandelt. Die Viskosität des Zementes nimmt während dieses Vorganges stetig zu und führt innerhalb kürzester Zeit zur Aushärtung des Zementes. Der Verlauf der Viskosität hängt dabei von der Zusammensetzung, dem Mischverhältnis, der Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur ab und ist daher, je nach Hersteller, unterschiedlich. Aus diesem Grund bedarf es besonderer Materialkenntnisse des Anwenders, um eine optimale Bearbeitung zu gewähren [72,73].

Vorteile:

- Ausgezeichnete Druckfestigkeit von 95 ± 5 MPa (Wirbelkörperspongiosa 2-20 MPa) mit Widerstandskraft sowohl gegen axiale Kompressionskräfte, als auch gegen Scher-, Biege- und Zugkräfte.

Nachteile:

- Erhöhte Frakturinzidenz von benachbarten Wirbelkörpern durch Zunahme der Steifigkeit über das physiologische Maß
- Fehlende Resorbierbarkeit mit Verbleib des Zements als inerte Masse im Wirbelkörper
- Im Körper ablaufende exotherme Polymerisationsreaktion mit einem Temperaturanstieg bis zu 60°C und damit verbunden das Risiko einer thermischen Schädigung des umliegenden Gewebes

- Zytotoxizität durch kontinuierlich freigesetzte Monomere bei unvollständiger Polymerisation mit der Gefahr von systemischen Nebenwirkungen
- Durch die unabdingbare Beimischung von Kontrastmittel kommt es zur Viskositätsabnahme und damit einer erhöhten Gefahr von Zementaustritten

1.5.1.2 Calciumphosphatzement (CaPh)

Calciumphosphatzemente sind anorganische Biomaterialien und stellen im Gegensatz zu anderen Knochenersatzmaterialien, eine vergleichsweise junge Werkstoffklasse dar. Brown und Chow führten 1975 erste erfolgreiche Versuche mit Calciumphosphatzement durch und meldeten 10 Jahre später das Verfahren zur Herstellung als Patent an. Mit dieser Entwicklung war es nun erstmals möglich, ein resorbierbares Knochenersatzmittel zur Augmentation zu nutzen und ermöglichte im späteren Verlauf die Indikationserweiterung auf junge Patienten mit traumatischen oder sekundär osteoporotischen Frakturen. Sie liegen als Zwei- oder Dreikomponentensysteme vor und bestehen aus pulvrigen Calciumphosphatverbindungen, die nach Vermengung mit der wässrigen Elektrolytkomponente, eine Abbindereaktion über einen Lösungs- und Fällungsmechanismus eingehen. Beide Reaktionen verlaufen isotherm bzw. leicht exotherm ab und geben den Großteil der Wärme bereits vor Applikation frei, sodass eine thermische Schädigung im Körperinneren bei dieser Zementart nicht zu erwarten ist. Die leichte Temperaturentwicklung im Wirbelkörper selbst erfolgt sehr langsam und kann über das zirkulierende Blutvolumen abgefangen werden. Die chemische Zusammensetzung ähnelt stark der anorganischen Knochenmatrix und bietet daher eine gute Biokompatibilität mit der Fähigkeit der Resorption. Nach Applikation des teigartigen Zements in den Wirbelkörper kommt es zu einer kompakten Verzahnung mit dem Knochen, eine definitive Festigkeit wird erst nach einigen Stunden bzw. Tagen erreicht. Aus diesem Grund wird bei diesen PatientInnen eine postoperative Bettruhe von 12h verordnet, bevor mit der Mobilisation begonnen wird. [72,74,75]

Vorteile:

- röntgenopak und daher keine additive Zugabe von Röntgenkontrastmittel erforderlich
- isothermische Kristallisation mit deutlich geringerer Temperaturentwicklung gegenüber PMMA-Zement
- Biokompatibilität mit ossärer Integration und langsamer Resorption des Zements durch neugebildeten Knochen
- keine toxischen Nebenreaktionen

Nachteile:

- gute Kompressionsfestigkeit aber keine ausreichend vorgegebene Resistenz gegen Zug- und Scherkräfte (1-10 MPa)
- Herabsetzung der Bindekraft während der Aushärtung bei Kontakt mit Körperflüssigkeiten (z.B. Blut) und damit der Gefahr des Materialbruches bis hin zum Auswaschen des Zements

2. Patienten und Methoden

2.1 Studiendesign

In der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine retrospektive, monozentrische Studie, welche an der Abteilung für Orthopädie und Traumatologie der Universitätsklinik Graz durchgeführt wurde. Anhand von Operationsbüchern und Krankenakten wurden dabei Daten von PatientInnen erhoben, die im Zeitraum von 01.01.2010 bis 31.12.2015 nach traumatischen Wirbelkörperfrakturen mittels Kyphoplastie und perkutaner dorsaler Stabilisierung versorgt wurden. Zusätzlich wurde bei diesen PatientInnen bereits die Entfernung des Osteosynthesematerials im Rahmen eines zweiten operativen Eingriffs durchgeführt.

2.2 PatientInnen

Primär wurden nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien 50 weibliche und männliche Patienten im Archiv gefunden. Für die notwendige Nachuntersuchung wurde mit den PatientInnen telefonischer Kontakt aufgenommen, um sie sowohl über den Ablauf und Nutzen der Studie aufzuklären. Von den 50 PatientInnen, hatten 15 kein Interesse, 3 konnten trotz mehrmaliger Anrufversuche nicht erreicht werden und 3 erschienen trotz vereinbarten Termins nicht zur Nachuntersuchung, sodass letztendlich 29 PatientInnen übrig geblieben waren, die erfolgreich an der Studie teilgenommen hatten.

Die Studie wurde bei der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz eingereicht, geprüft und freigegeben. (EK Nummer: 28-402 ex 15/16).

2.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien:

- Patientenalter zum Zeitpunkt der ersten Operation: 16-70 Jahre
- Traumatisch bedingte A3 und A4 (nach AOSpine Klassifikation) Frakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule ohne neurologischer Ausfallsymptomatik
- Perkutane operative Versorgung durch dorsale Instrumentierung mit monoaxialen Schrauben und Kyphoplastie des Wirbelkörpers mittels Calciumphosphat- oder Polymethylmethacrylatzement
- Lückenlose bildgebende Diagnostik mit Röntgenbildern vor und nach der Operation, vor der Metallentfernung und mindestens 6 Monate nach Entfernung des Metalls

Ausschlusskriterien

- Schwangerschaft zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung, falls die Anfertigung eines Röntgenbildes notwendig ist
- Typ B und C Frakturen (nach AOSpine Klassifikation)
- Pathologische Fraktur des betroffenen Wirbelkörpers
- Weitere Wirbelkörperfrakturen in den angrenzenden Segmenten mit relevantem Höhenverlust oder kyphotischer Fehlstellung
- Bekannte Osteoporose
- Relevante degenerative Schäden oder traumatologische Vorschäden im Frakturgebiet
- Relevante Extremitätenverletzungen oder andere Begleitverletzungen im Rahmen eines Polytraumas mit andauernden Einschränkungen, welche, entscheidend auf den Oswestry Disability Index, Einfluss nehmen können
- Frailty (Gebrechlichkeit)

Bei allen PatientInnen erfolgten präoperativ ein konventionelles Röntgen und zusätzlich eine Computertomografie. PatientInnen, welche von einem peripheren Krankenhaus zugewiesen wurden, hatten, sofern eine Computertomografie vorhanden war, bereits beide Untersuchungen durchgeführt. Das konventionelle Röntgenbild fungierte dabei zur Diagnose und Lokalisation der Fraktur. Anhand

der Computertomografie konnte zur eindeutigen Frakturklassifikation, die hintere Wirbelkörperkante sowie Zustand und Weite des Spinalkanals beurteilt werden. Das untersuchte Patientenkollektiv bestand aus 15 Männern und 14 Frauen mit einem mittleren Alter von 43 bzw. 45 Jahren. Das Alter der jüngsten Person betrug dabei 17 Jahre, die älteste Person wurde mit 66 Jahren operiert.

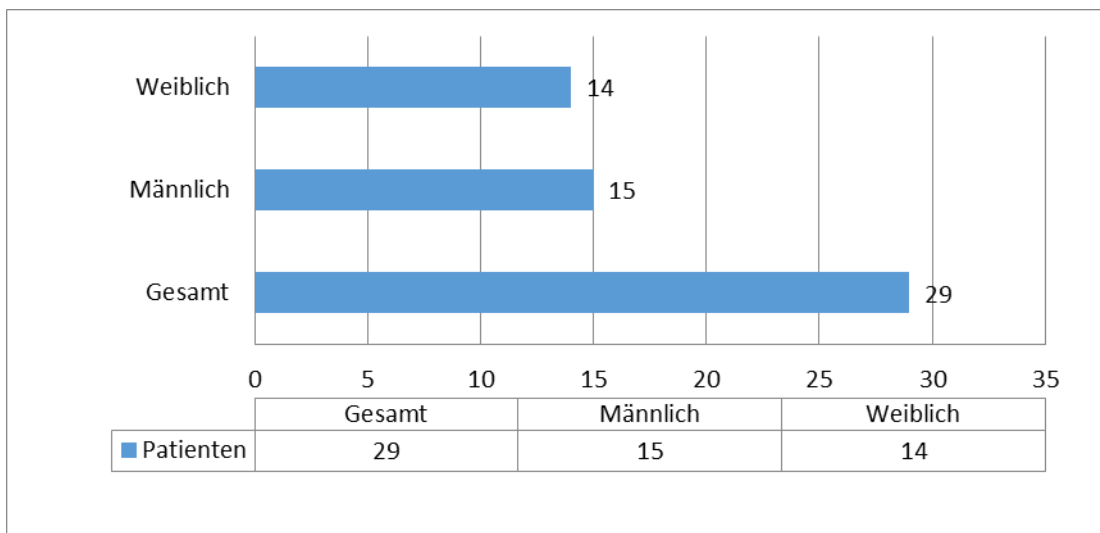


Abbildung 14: Geschlechterverteilung der PatientInnen

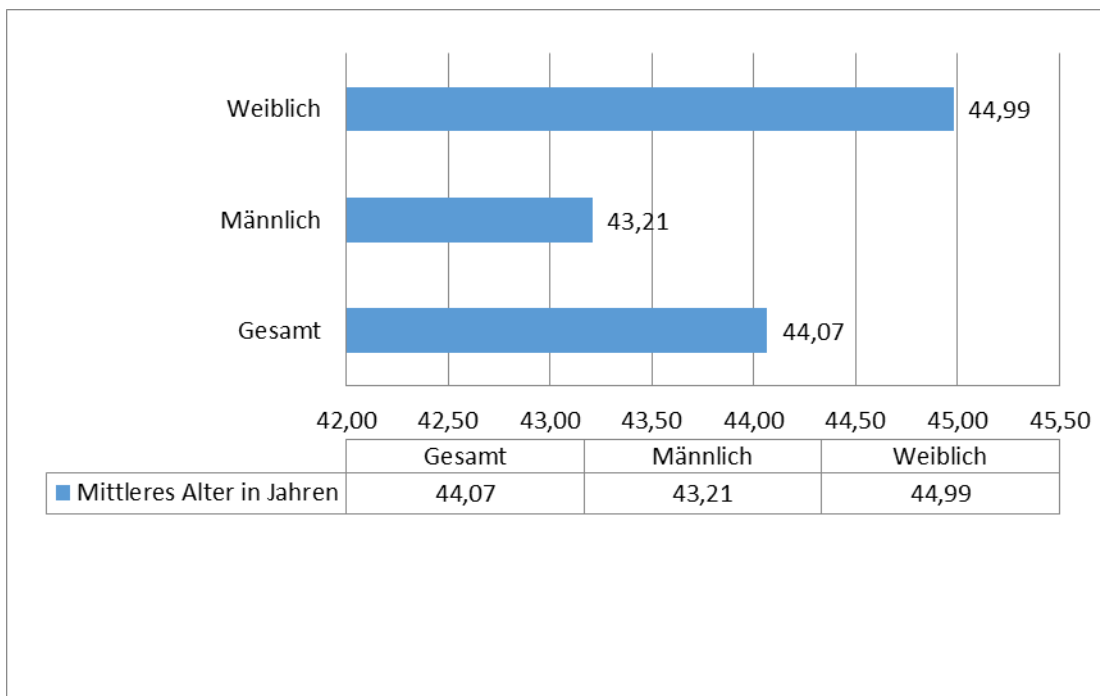


Abbildung 15: Altersverteilung der PatientInnen

2.4 Nachuntersuchungen

Erste klinische Kontrollen mit Überprüfung des Repositionsergebnisses erfolgten ein bis zwei Tage und 2 Wochen nach der Operation. Weitere ambulante Kontrollen wurden nach drei und sechs Monaten postoperativ sowie vor Metallentfernung und mindestens 6 Monate nach Metallentfernung durchgeführt. Zu jedem dieser Zeitpunkte wurden konventionelle Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen des betroffenen Wirbelsäulenabschnittes angefertigt, wobei das erste postoperative Bild, je nach Verfassung des/der Patient/in im Liegen oder Stehen durchgeführt wurde, alle darauffolgenden Aufnahmen wurden in stehender Position durchgeführt. Messungen der Wirbelkörperhöhe und des bisegmentalen Kyphosewinkels nach Cobb erfolgten präoperativ, postoperativ, vor Metallentfernung und mindestens sechs Monate nach Metallentfernung. Bei der Abschlussuntersuchung nach Explantation des Fixateurs interne wurde die körperliche Beeinträchtigung anhand des Oswestry Disability Index (ODI) und lokale Restbeschwerden im Operationsgebiet mittels manuell durchgeführter segmentaler Schmerzdiagnostik evaluiert.

2.5 Körperliche Beeinträchtigung: Oswestry Disability Index

Der Oswestry low back pain disability questionnaire ist ein etabliertes Instrument um sowohl den Schmerz-, als auch den Funktionsstatus bei PatientInnen mit Rückenbeschwerden zu erheben. Er wurde 1976 von John O'Brian entwickelt und von Fairbank et al. im Jahre 1980 erstmals publiziert. Seitdem wurde der Test von Wissenschaftlern ständig geändert, die aktuellste Version wurde 2000 im "The Spine Journal" veröffentlicht und ist für viele Kliniker und Forscher der Goldstandard zur quantitativen Ermittlung der funktionellen Beeinträchtigung. Der ODI kann von den Personen selbstständig ausgefüllt werden und nimmt rund zehn Minuten in Anspruch. Dabei beurteilen die PatientInnen in zehn verschiedenen Bereichen und Aktivitäten des täglichen Lebens die subjektiv empfundene Einschränkung. Zu den Bereichen zählen Schmerzen, Körperpflege, Stehen, Gehen, Sitzen, Heben, Schlafen, Reisen, Sozial- und Sexualleben. Zu jeder Frage gibt es sechs verschiedene Antwortmöglichkeiten, die mit 0 - 5 Punkten bewertet werden können. Dabei bedeutet eine Bewertung von 0 Punkten, dass keine Einschränkung in diesem Funktionsbereich vorliegt. Ist der/die Patient/in nicht in der Lage die angeführte Aktivität durchzuführen, werden 5 Punkte vergeben. Pro Frage ist nur eine Antwort zulässig, sodass ein maximaler Wert von 50 Punkten erreicht werden kann. Bei nicht vollständiger Beantwortung aller Fragen werden dementsprechend je Gebiet fünf Punkte abgezogen und die maximal erreichbaren Punkte angepasst. Abschließend werden die erreichten Punkte, in Abhängigkeit der maximal möglichen Punktezahl, in einem prozentualen Wert umgerechnet und der Grad der Beeinträchtigung anhand der vorliegenden Tabelle angegeben [76,77].

Testergebnis in Prozent	Grad der Behinderung
0-20	minimale Behinderung
21-40	mäßige Behinderung
41-60	starke Behinderung
61-80	invalidisierend
81-100	bettlägerig

Tabelle 2: Gruppeneinteilung des Oswestry Disability Index

2.6 Segmentale Schmerzdiagnostik

Um zu überprüfen, ob im ehemaligen Operationsgebiet noch Restbeschwerden vorhanden waren, wurde im Zuge der Abschlussuntersuchung eine klinische Untersuchung der Wirbelsäule vorgenommen. Für die segmentale Diagnostik liegt der/die Patient/in in Bauchlage oder nimmt eine sitzende Position ein. Ausgangspunkt ist die Palpation des Dornfortsatzes des vierten Lendenwirbelkörpers, der unter Zuhilfenahme der Beckenkämme aufgesucht wird. Zur exakten Bestimmung wird hierfür die radiale Kante der Zeigefinger an den kranialsten Punkten der beiden Cristae iliacae angelegt und die Daumen in gleicher Höhe in Richtung Mittellinie der Wirbelsäule abgespreizt. Mit dem Endglied des Daumens lässt sich nun die untere Kante des Dornfortsatzes L4 ertasten. Im nächsten Schritt wird nun, ausgehend von dieser Stelle, der Dornfortsatz des ehemals frakturierten Wirbelkörpers ermittelt, indem die notwendigen Dornfortsätze nach kranial bzw. kaudal gezählt und gleichzeitig palpirt werden. Anschließend erfolgt nun die segmentale Diagnostik. Die Druckpunkte zur Auslösung etwaiger Schmerzen liegen im Bereich der Lendenwirbelsäule zwischen zwei Dornfortsätzen und rund 2 cm von der Mittellinie entfernt und entsprechen der Lokalisation der Facettengelenke. Im Brustwirbelsäulenabschnitt befinden sich die segmentalen Druckpunkte nahezu auf gleicher Höhe des jeweiligen Dornfortsatzes und geringfügig näher an der Mittellinie. Mit den Daumen wird nun seitengleich ein gemäßiger Druck auf die Facettengelenke ausgeübt und der/die Patient/in nach möglichen Schmerzen gefragt. Gibt der Patient dabei Schmerzen an, werden diese noch weiter in leichte und starke Schmerzen klassifiziert. Die Schritte werden abschließend für das kaudale und kraniale Segment wiederholt, um Irritationen der ehemals platzierten Pedikelschrauben zu evaluieren [78].

2.7 Radiologische Auswertung

Zur Beurteilung des Repositionsergebnisses wurden die radiologischen Aufnahmen vor Operation, unmittelbar nach Operation, vor Metallentfernung und mindestens 6 Monate nach Metallentfernung verwendet.

Die Ermittlung der Wirbelkörperhöhe erfolgte an den seitlichen Röntgenaufnahmen. Dabei wurde der Abstand von Deckplatte bis zur Grundplatte an der Vorderkante, Hinterkante und im Zentrum des Wirbelkörpers ausgemessen. Pro Röntgenbild wurde dabei immer der frakturierte bzw. kyphoplastierte, sowie die beiden kaudal und kranial angrenzenden Wirbelkörper vermessen. Zur Bestimmung der relativen Wirbelkörperhöhe wurde der Mittelwert der angrenzenden Wirbel berechnet und im Verhältnis zum frakturierten Wirbel dargestellt. Als Ergebnis wurde die Wirbelkörperhöhe des frakturierten Wirbels in Prozent angegeben.

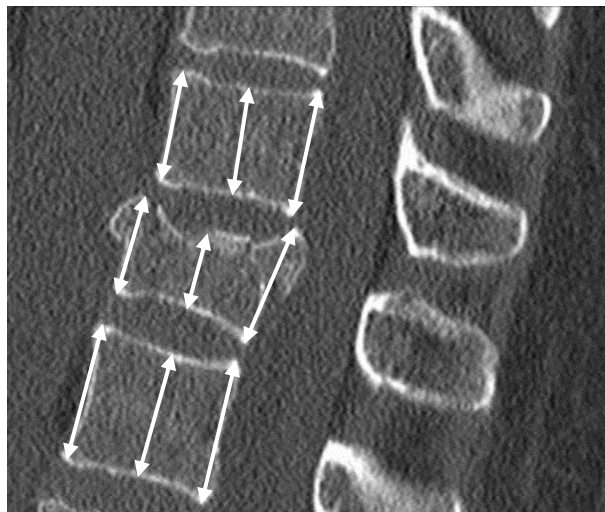


Abbildung 16: Messung der Wirbelkörperhöhe

Als Kriterium für die Profiländerung des Bewegungssegmentes diene der bisegmentale Kyphosewinkel nach Cobb. Der Winkel wurde gemessen, indem an der Deckplatte kranial sowie an der Grundplatte kaudal des frakturierten Wirbelkörpers jeweils eine Gerade angelegt wird. Im nächsten Schritt wurden zwei weitere Linien gezeichnet, die orthogonal zu den beiden zuvor gezeichneten Geraden stehen. Am Schnittpunkt der beiden Linien wurde der Kyphosewinkel in Grad gemessen. Einem positiv gemessenen Winkel entspricht eine kyphosierte Krümmung des Bewegungssegments, negativ ermittelte Werte stellen eine Lordose dar.

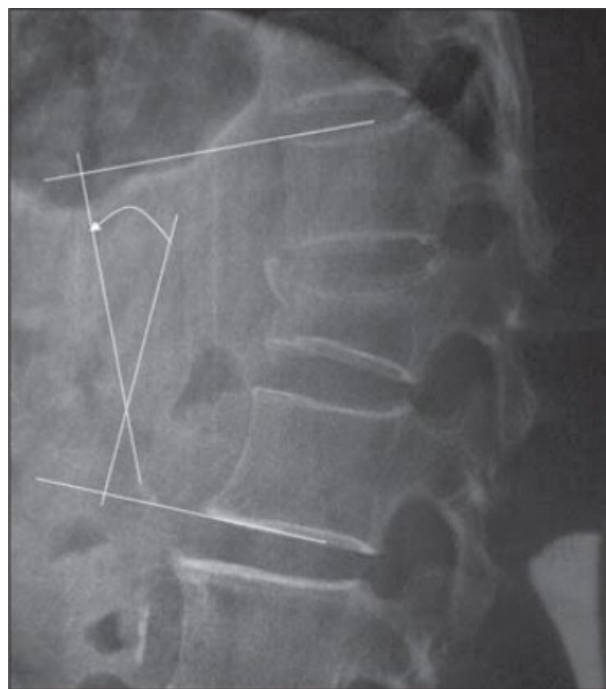


Abbildung 17: Messung des bisegmentalen Kyphosewinkels nach Cobb [83]

Die Messung der Wirbelkörperhöhe erfolgte mit der integrierten Vermessungsfunktion des Bildarchivierungssystems PACS (Picture Archiving and Communication System). Für die Bestimmung des Kyphosewinkels wurden die Röntgenbilder ausgedruckt und manuell mittels Geometriedreieck vermessen.

3. Ergebnisse

3.1 Unfallmechanismus

Die überwiegende Zahl der Frakturen ereignete sich durch Stürze. Von den 29 PatientInnen stürzten 21 (72,4 %), 4 (13,8 %) erlitten eine Fraktur des Wirbelkörpers im Rahmen eines Verkehrsunfalles, 2 (6,9 %) verletzten sich mit dem Paragleiter während der Landungsphase, 1 (3,4 %) PatientIn wurde bei Forstarbeiten von einem herabstürzenden Baum getroffen und eine weitere Person (3,4 %) erlitt eine Berstungsfraktur beim Heben einer schweren Last.

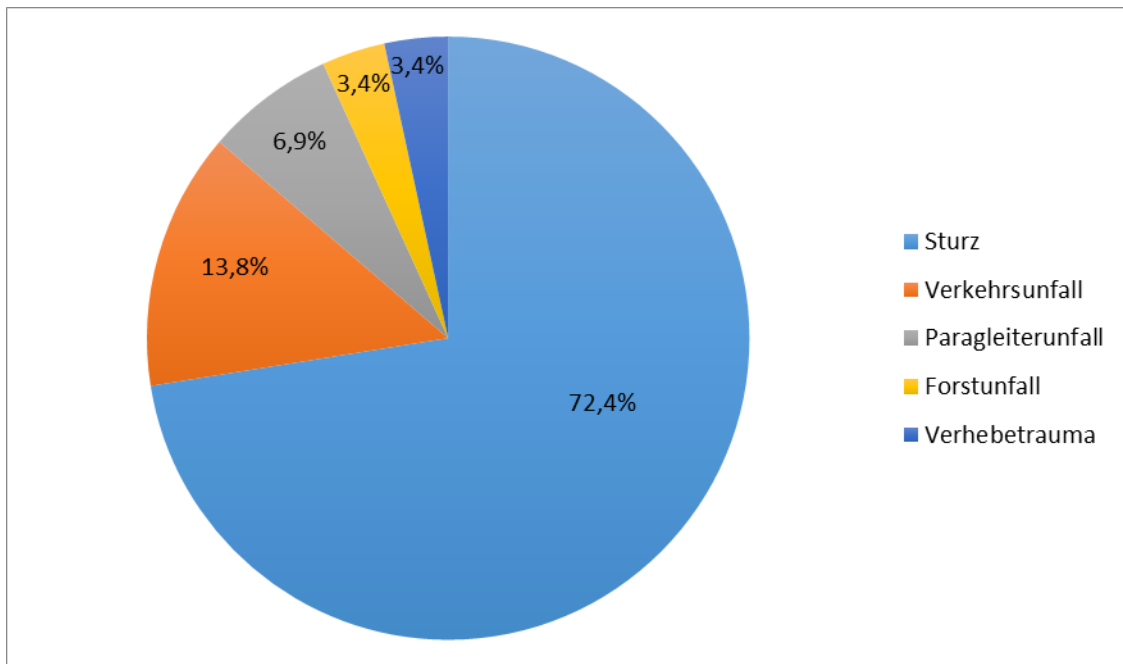


Abbildung 18: Verteilung der Frakturen nach Art des Unfallmechanismus

3.2 Frakturlokalisation und Klassifikation

Die Lokalisationen der Frakturen stimmten in dieser Studie mit den Angaben in der Literatur überein und schlossen die Segmente Th7 bis L4 ein. Zwei PatientInnen hatten zusätzlich je eine weitere Fraktur, die jedoch keinen relevanten Höhenverlust zeigten und damit konservativ therapiert wurden. Von den 29 operativ versorgten Wirbelkörperfrakturen war das Segment L1 mit 31 % (9 Frakturen) am häufigsten betroffen. 24,1 % (7 Frakturen) entfielen auf das kranial angrenzende Segment Th12, 20,7 % (6 Frakturen) auf L2, 10,3 % (3 Frakturen) auf L3, 6,9 % (2 Frakturen) auf Th7 und je 3,4 % (1 Fraktur) teilten sich auf die Segmente Th11 und L4 auf.

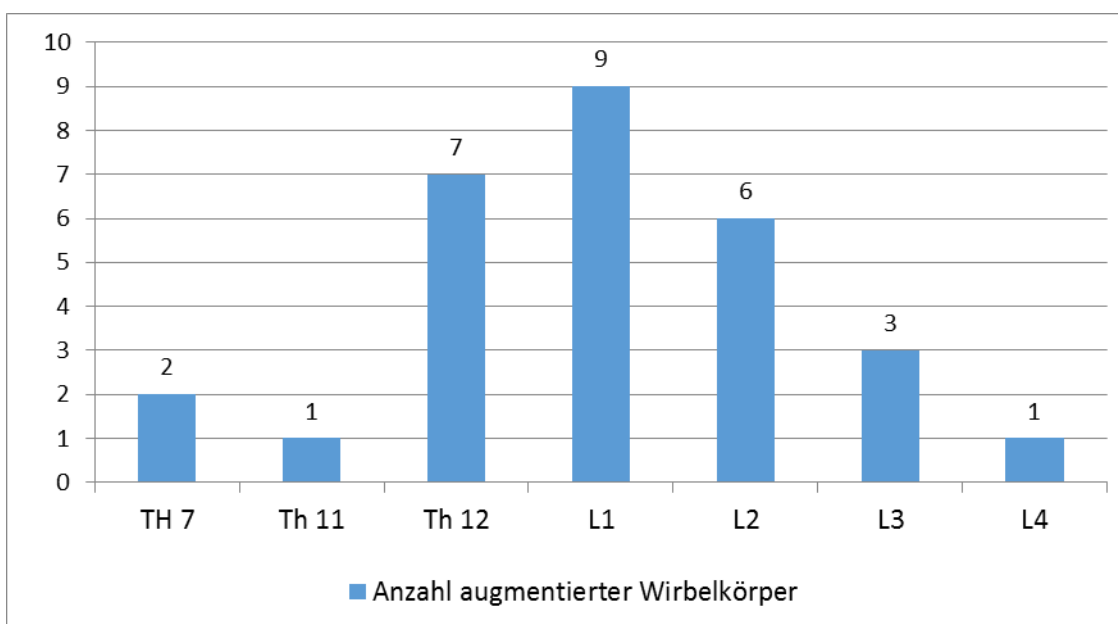


Abbildung 19: Verteilung der betroffenen Wirbelkörper

Alle Frakturen wurden anhand der durchgeführten Computertomografie bzw. Röntgenbilder beurteilt und nach der AOSpine Klassifikation eingeteilt. Da nur Kompressionsfrakturen des Subtyps A3 und A4, welche Wirbelkörperberstungsfrakturen entsprechen, in die Studie miteinbezogen wurden, verteilten sich die Brüche folgendermaßen: 55,2 % (16 Frakturen) wurden als A3 Frakturen klassifiziert, in 44,8 % der Fälle (13 Frakturen) waren beide Endplatten betroffen, die demnach zur Gruppe der A4 Frakturen zählten.

3.3 Wahl des Knochenzements zur Wirbelkörperaugmentation

Bei der Kyphoplastie wurde in Abhängigkeit des Alters und der Morphologie der Fraktur entweder Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Calciumphosphatzement (CaPh) als Füllmaterial verwendet. Die Vor- und Nachteile der beiden Materialien wurden bereits im Kapitel Knochenersatzwerkstoffe beleuchtet. Ausgehend von den 29 augmentierten Wirbelkörpern wurde 22 mal (75,9 %) der biokompatible Calciumphosphatzement verwendet, die restlichen 7 Wirbeln (24,1 %) wurden mit Polymethylmethacrylatzement aufgefüllt. Das durchschnittliche Alter in der Gruppe CaPh betrug dabei 39,35 Jahre, PatientInnen, welche mit PMMA Zement versorgt wurden, waren im Mittel 58,91 Jahre alt.

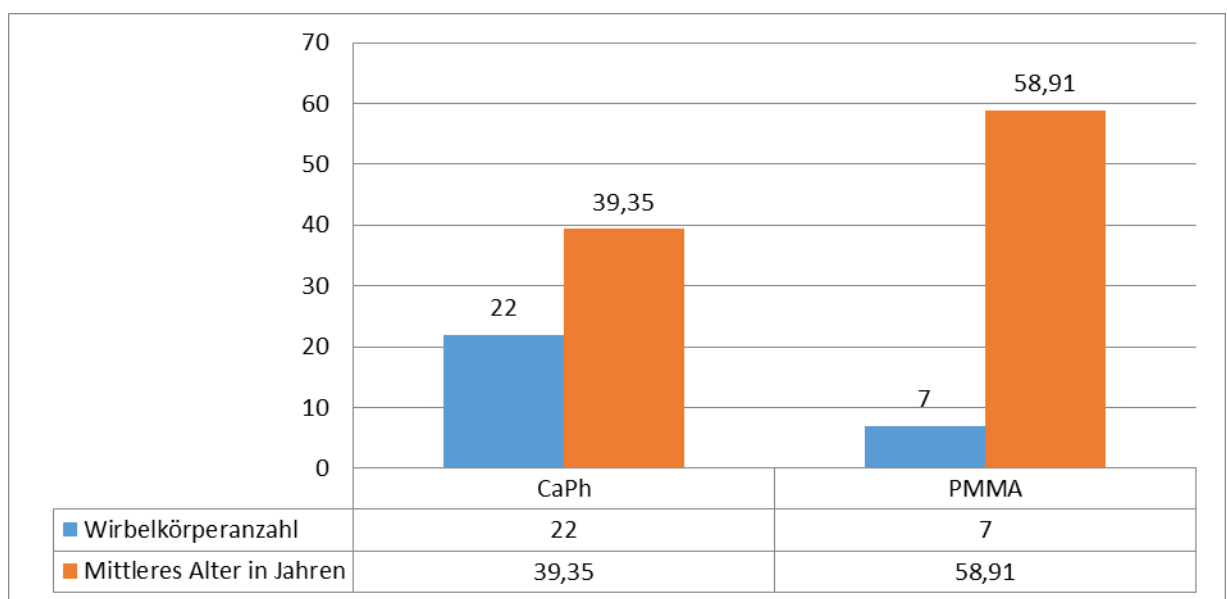


Abbildung 20: Verteilung der PatientInnen nach Wahl des Zements

3.4 Oswestry Disability Index (ODI)

Der ODI konnte bei der Abschlussuntersuchung von allen PatientInnen erfolgreich ausgefüllt werden und zeigte gute Ergebnisse. Der durchschnittliche ODI Wert aller 29 PatientInnen lag bei 19,86 % und fiel in die niedrigste Kategorie "minimale Behinderung". Teilt man die PatientInnen separat in die einzelnen Gruppen auf, so hatten insgesamt 17 Patienten (58,6 %) nach Metallentfernung noch minimale Behinderungen, 5 Patienten (17,2 %) eine mäßige Behinderung und 7 Patienten (24,1 %) waren laut Auswertung stark behindert. Keine der PatientInnen wiesen eine körperliche Beeinträchtigung von über 60 % auf und waren daher zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung weder invalidisierend, noch bettlägerig. Die größten Defizite wurden dabei in den Bereichen Heben schwerer Lasten, Sitzen, Gehen und Stehen verzeichnet.

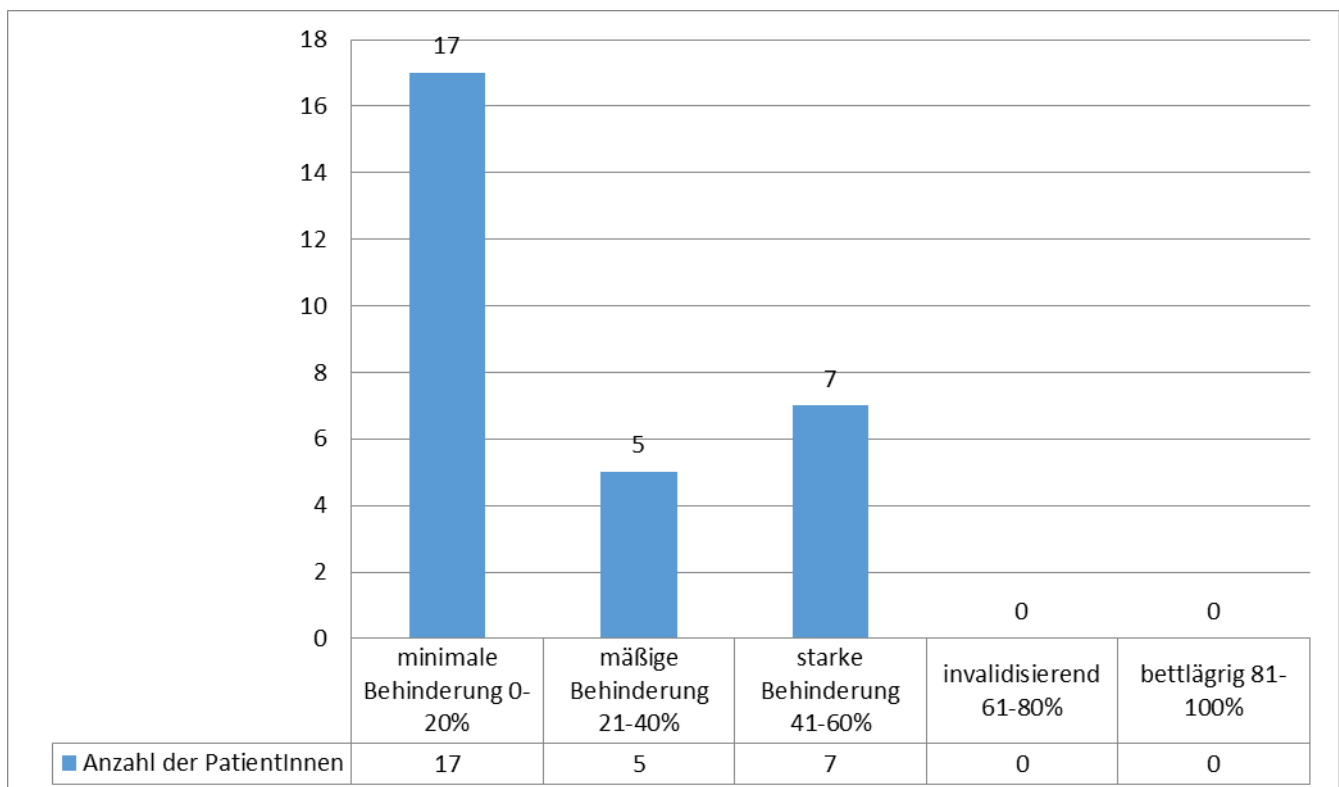


Abbildung 21: Ergebnisse des Oswestry Disability Index

3.5 Segmentale Schmerzdiagnostik

Die Auswertung der segmentalen Schmerzdiagnostik zeigte, dass 17 PatientInnen (58,6 %) keine lokalen Beschwerden im ehemaligen Operationsgebiet hatten. Insgesamt gaben 4 PatientInnen (13,8 %) geringe Schmerzen in allen 3 Segmenten an, nur ein/e Patient/in (3,4 %) verspürte geringe Schmerzen im betroffenen und starke Schmerzen im kranial und kaudal angrenzendem Segment. Die restlichen 7 PatientInnen (24,1 %) gaben zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung geringe Schmerzen in maximal zwei Segmenten an. Überraschend war auch, dass die Beschwerden weniger im kyphoplastierten Segment bestanden, sondern viel mehr das darüber- bzw. darunterliegende Segment, in welchem zuvor die Pedikelschrauben platziert waren, betrafen.

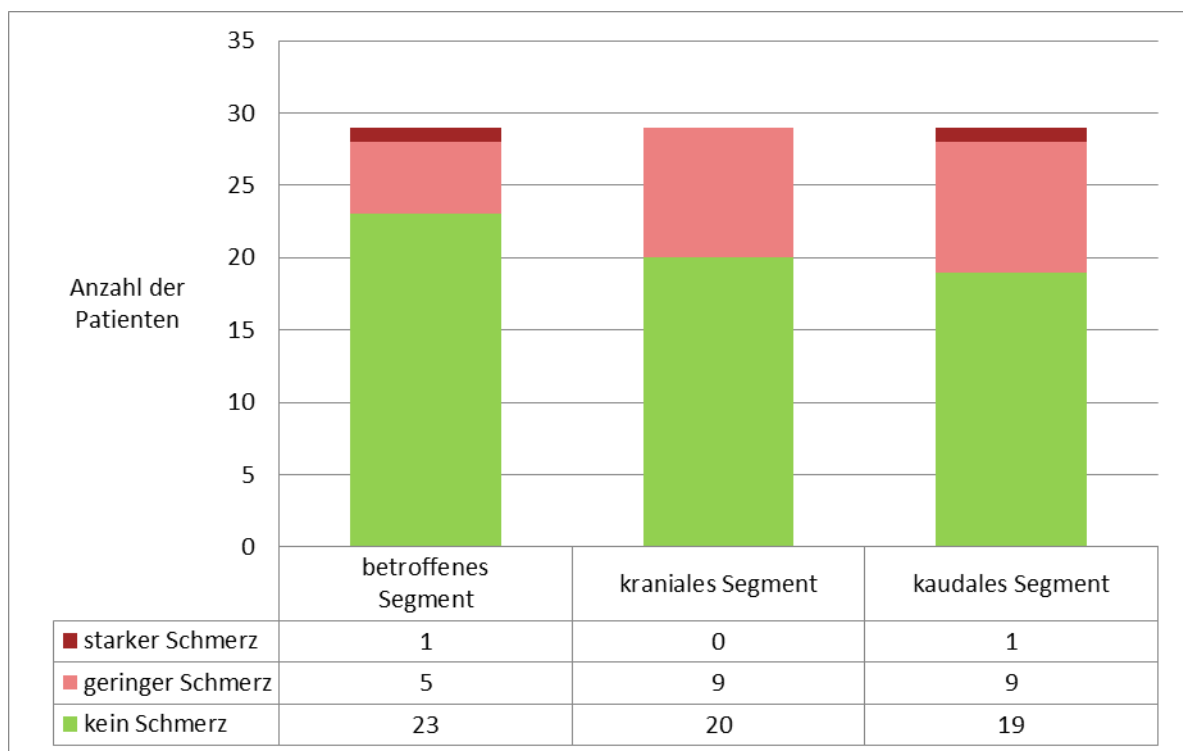


Abbildung 22: Ergebnisse der segmentalen Schmerzdiagnostik

3.6 Radiologische Auswertung

Wirbelkörperhöhe

Die Wirbelkörperhöhe an allen drei gemessenen Stellen konnte durch die Operation gut angehoben werden, erlitt aber im Verlauf einen Verlust.

Vorderkante

Die vordere Wirbelkörperhöhe betrug vor dem operativen Eingriff im Mittel 65,81 % und war unmittelbar nach der Operation auf 91,78 % angestiegen. Dies ergibt einen Korrekturgewinn von 25,97 %, was eine statistisch hochsignifikante Verbesserung ($p < 0,001$) ergibt. Bei der Nachuntersuchung, vor Entfernung des Fixateurs interne, sank die vordere Kante im Mittel um 6,22 % auf 85,86 % herab und blieb nach Metallentfernung mit 85,63 % annähernd stabil. Der Verlust von 0,07 % zwischen den beiden letzten Zeitpunkten ist statistisch nicht signifikant ($p = 0,943$).

Wirbelkörperhöhe Vorderkante			
	Mittelwert (%)	Standardabweichung	Signifikanz
vor Operation	65,81	14,53	
nach Operation	91,78	9,35	<0,001*
vor Metallentfernung	85,86	13,13	
nach Metallentfernung	85,63	12,32	0,943**
*: $p < 0,001$ im Vergleich zu präoperativ = statistisch signifikant			
**: $p > 0,05$ im Vergleich zu vor Metallentfernung = statistisch nicht signifikant			

Tabelle 3: Statistische Ergebnisse an der Vorderkante des Wirbelkörpers

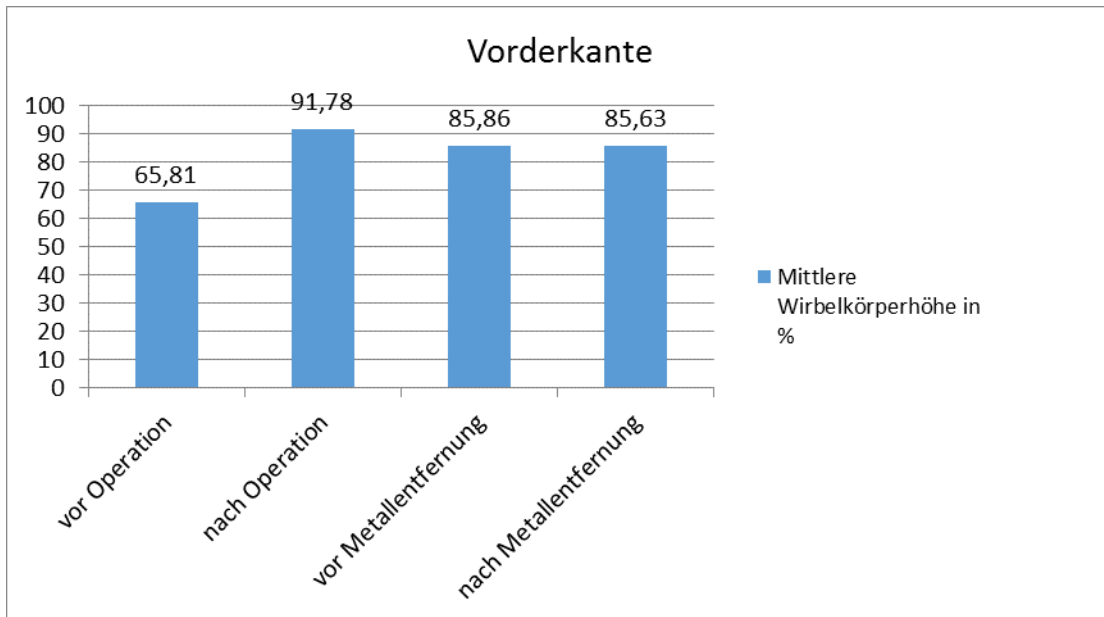


Abbildung 23: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe an der Vorderkante

Zentrum

Die Abstände zwischen den beiden Endplatten in der Mitte des Wirbelkörpers verhielten sich ähnlich zu den Ergebnissen der Vorderkante. Die mittlere Höhe betrug initial 64,74 % und konnte nach der Operation auf 89,64 % angehoben werden. Dies entspricht wiederum einem statistisch hochsignifikanten Korrekturgewinn von 24,9 % ($p < 0,001$). Auch hier konnte das Repositionsergebnis nicht vollständig gehalten werden und sank, vor Entfernung des Metalls, im Mittel um 5,15 % auf 84,49 % ab. Bei der letzten Kontrolle konnte kein signifikanter Höhenverlust mehr festgestellt werden ($p = 0,875$). Die abschließende Höhe betrug 84,29 %, der weitere Korrekturverlust betrug durchschnittlich nur 0,2 %.

Wirbelkörperhöhe Zentrum			
	Mittelwert (%)	Standardabweichung	Signifikanz
vor Operation	64,74	12,48	
nach Operation	89,64	9,64	<0,001*
vor Metallentfernung	84,49	11,51	
nach Metallentfernung	84,29	9,64	0,875**
*: $p < 0,001$ im Vergleich zu präoperativ = statistisch signifikant			
**: $p > 0,05$ im Vergleich zu vor Metallentfernung = statistisch nicht signifikant			

Tabelle 4: Statistische Ergebnisse im Zentrum des Wirbelkörpers

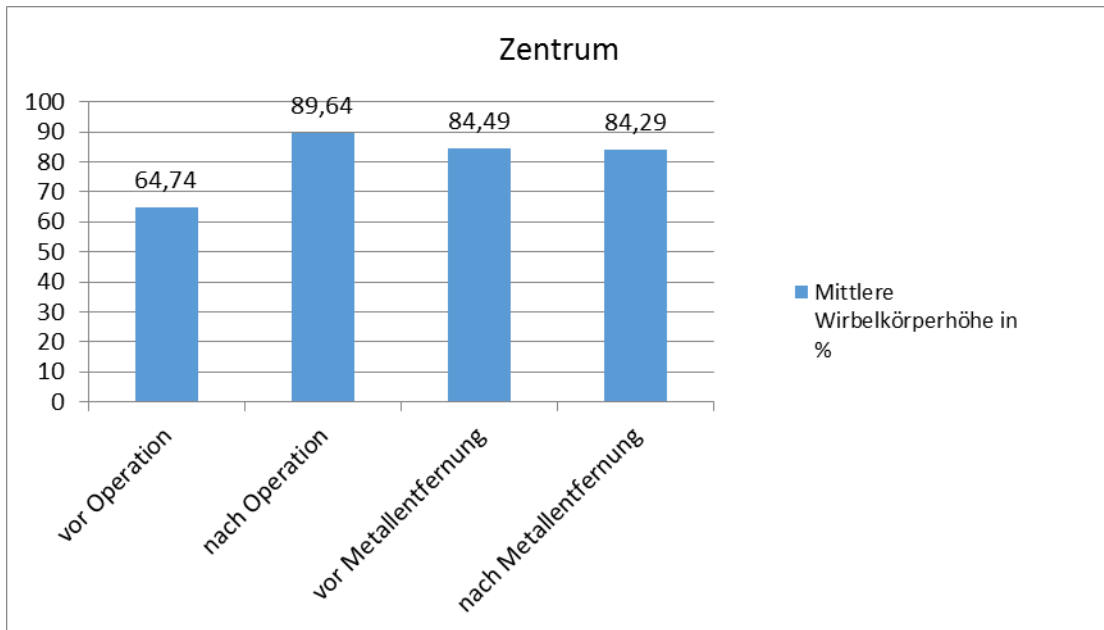


Abbildung 24: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe im Zentrum

Hinterkante

Die dorsale Kante des Wirbelkörpers war, bezogen auf das Ausmaß der Kompression, am wenigsten stark betroffen und wies eine durchschnittliche präoperative Höhe von 88,96 % auf. Trotz diesen geringen Höhenverlusts, konnte die Hinterkante durch die Technik der Kyphoplastie um 7,2 % auf 96,16 % angehoben werden, der Höhengewinn war statistisch hoch signifikant. Im weiteren Verlauf nahm die Höhe bis zur Entfernung des Osteosynthesematerials lediglich um 0,06 % ab und betrug 95,1 %. Als Einzige aller drei Messstellen konnte nach Entfernung des Metalls ein Höhengewinn von 0,29 % verzeichnet werden.

Wirbelkörperhöhe Hinterkante			
	Mittelwert (%)	Standardabweichung	Signifikanz
vor Operation	88,96	11,29	
nach Operation	96,16	5,2	<0,001*
vor Metallentfernung	95,1	6,54	
nach Metallentfernung	95,39	6,88	0,768**
*: p<0,001 im Vergleich zu präoperativ = statistisch signifikant			
**: p>0,05 im Vergleich zu vor Metallentfernung = statistisch nicht signifikant			

Tabelle 5: Statistische Ergebnisse an der Hinterkante des Wirbelkörpers

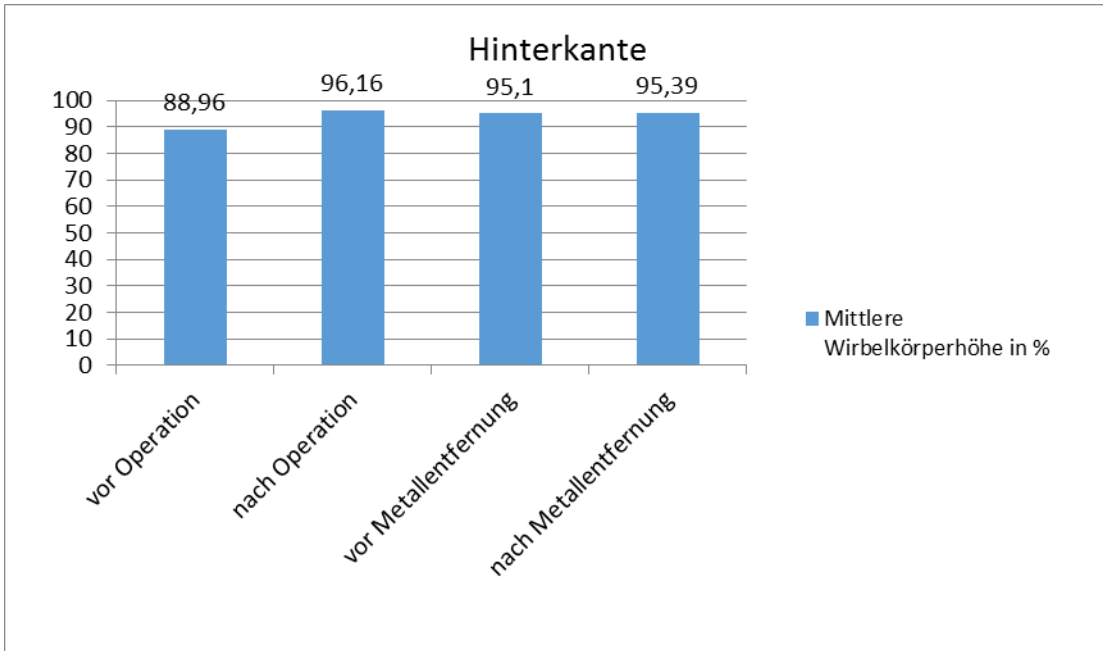


Abbildung 25: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe an der Hinterkante

Entwicklung der Wirbelkörperhöhe

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine gemeinsame grafische Darstellung der Höhenentwicklung am vorderen, mittleren und hinteren Anteil der frakturierten Wirbelkörper.

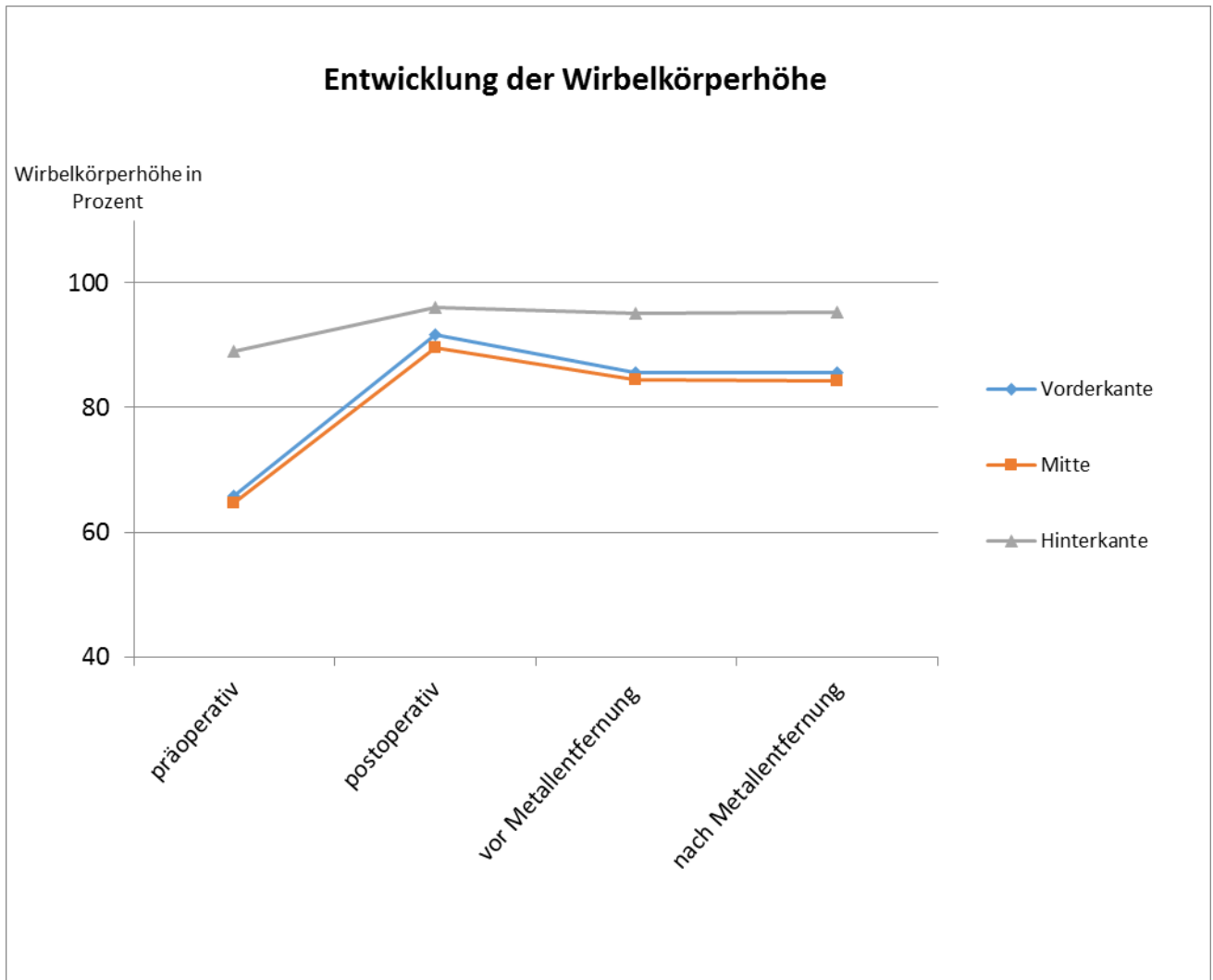


Abbildung 26: Höhenentwicklung des Wirbelkörpers an der Vorderkante, Hinterkante und im Zentrum

Reduktion der Kyphose

Der durchschnittliche präoperative bisegmentale Kyphosewinkel nach Cobb betrug 6,34 Grad. Durch die kombinierte operative Technik konnte dieser Winkel um 7,13 Grad auf -0,79 Grad korrigiert werden. Die Korrektur war hochsignifikant ($p < 0,001$), die Bewegungssegmente waren im Mittel leicht lordotisch reponiert. Im weiteren Verlauf kam es wieder zu einer Zunahme des Winkels, dieser betrug nun vor Metallentfernung 4,79 Grad. Das Ergebnis entspricht einem Korrekturverlust von 4 Grad. Auch nach Explantation des Fixateurs interne zeigte sich ein weiterer Korrekturverlust von 0,28 Grad auf insgesamt 5,07 Grad. Der Unterschied vor und nach Metallentfernung ist statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$). Vergleicht man die Ausgangswerte mit den Werten zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung konnte eine langfristige Aufrichtung von 1,27 Grad erreicht werden. Ergänzend muss jedoch angemerkt werden, dass die präoperativen Bilder fast alle im Liegen aufgenommen wurden und die Abschlussröntgen alle Stehend-Aufnahmen waren.

bisegmentaler Kyphosewinkel nach Cobb			
	Mittelwert (Grad)	Standardabweichung	Signifikanz
vor Operation	6,34	13,14	
nach Operation	-0,79	12,99	<0,001*
vor Metallentfernung	4,79	14	
nach Metallentfernung	5,07	15,37	0,735**
*: $p < 0,001$ im Vergleich zu präoperativ = statistisch signifikant			
**: $p > 0,05$ im Vergleich zu vor Metallentfernung = statistisch nicht signifikant			

Tabelle 6: Statistische Ergebnisse des bisegmentalen Kyphosewinkels

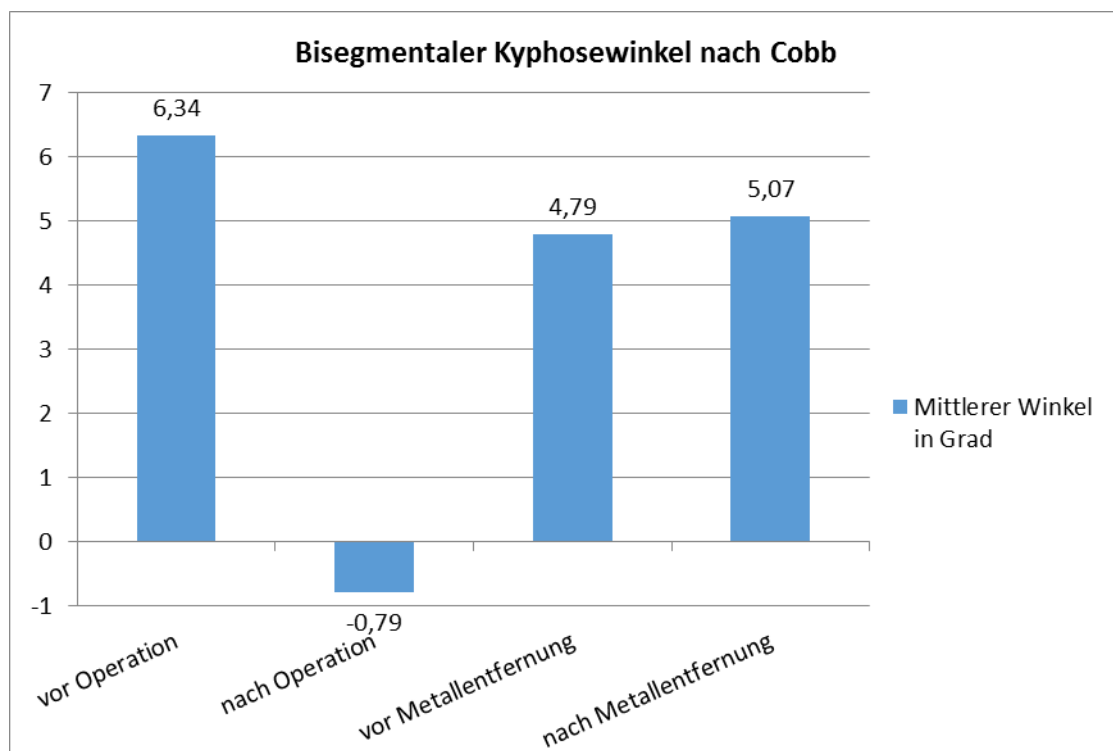


Abbildung 27: Entwicklung des bisegmentalen Kyphosewinkels

3.7 Komplikationen

Sowohl während der Operation, als auch im Zeitraum bis zur letzten Nachuntersuchung kam es zu keiner kardiovaskulären, neurologischen oder embolischen Komplikation, welche im Rahmen der Operationstechnik auftreten könnte. Bei 3 Patientinnen kam es zu asymptomatischen Zementaustritten. Dabei extrudierte der Zement, ausgehend von dem frakturierten Wirbelkörper, je einmal in das obere und untere Bandscheibenfach und einmal nach ventral.

Bei zwei PatientInnen kam es postoperativ im Bereich des Fixateur interne zu einer Lockerung der Schraubenmutter, worauf das Osteosynthesematerial frühzeitig bei einem Betroffenen nach 97 Tagen und einmal nach 27 Tagen entfernt werden musste.

3.8 Fallbeispiele

Fall 1

- 17 jähriger männlicher Patient
- Verkehrsunfall am 24.08.2011, Vorstellung und Übernahme von einem peripheren Krankenhaus am 26.08.2011
- Inkomplette Berstungsfraktur L1 (A3)
- Deckplattenimpressionsfraktur L2 (A1)

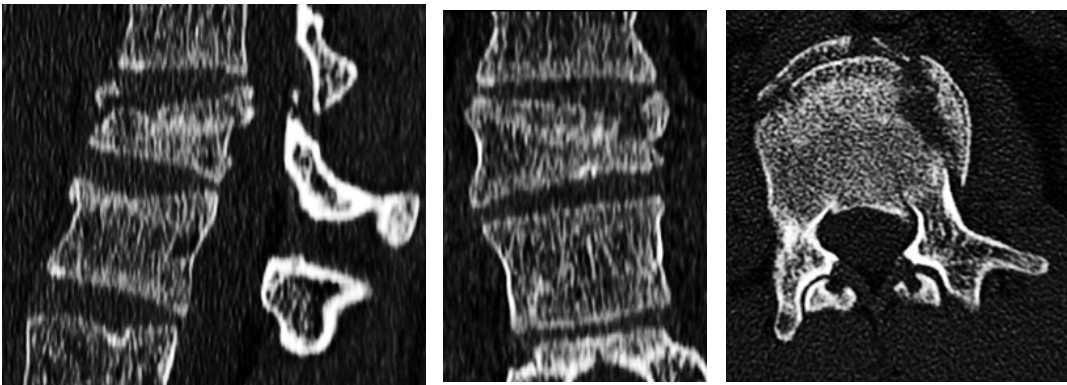


Abbildung 28: präoperative CT-Aufnahmen

- OP am 26.08.2011 mittels Kyphoplastie L1 und dorsaler Stabilisierung Th12- L2:
Korrektur der Kyphose von 10 Grad auf 3 Grad
Korrektur der Lateralklination von 6 Grad auf 2 Grad

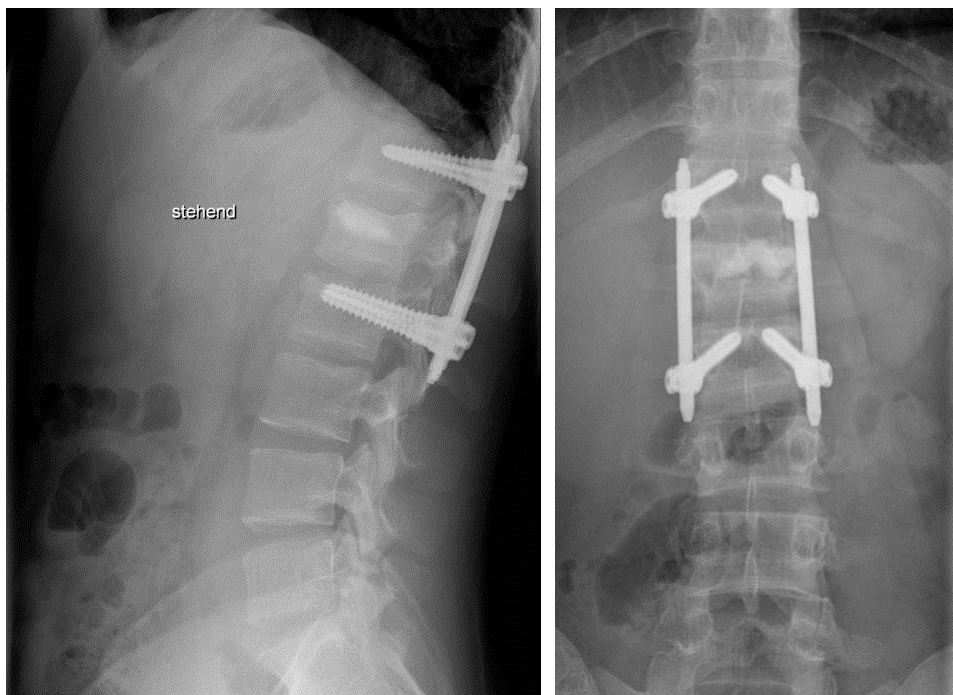


Abbildung 29: postoperative Röntgenaufnahmen

- Kontrolle 9 Monate nach Erstoperation vor geplanter Metallentfernung:
Bildung eines Spondylophyten an der Vorderkante mit beginnender Überbauung des kranialen Segments

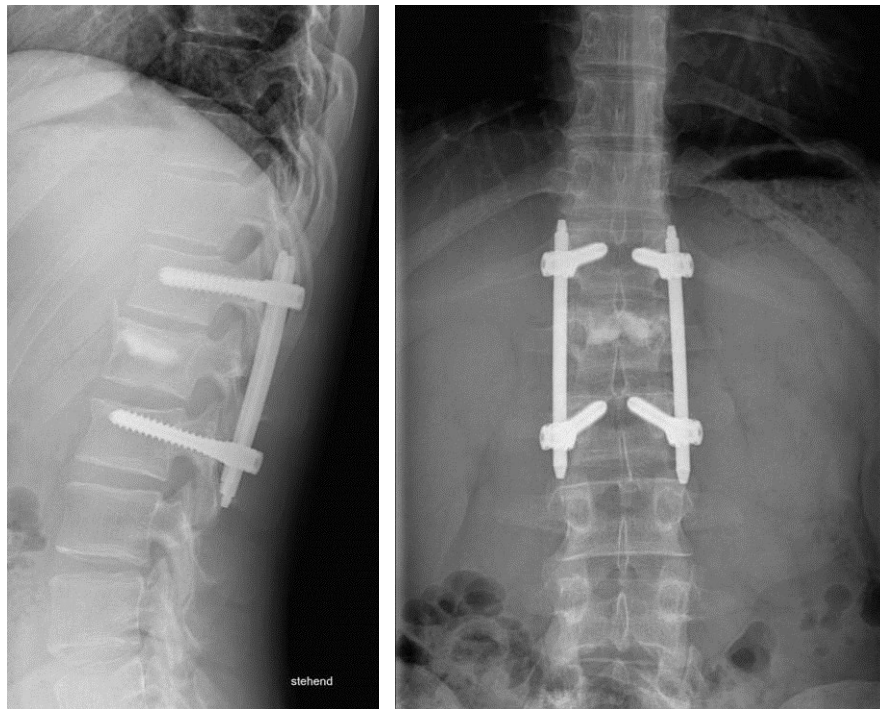


Abbildung 30: Röntgenaufnahmen vor Metallentfernung

- Kontrolle 3,5 Jahre nach Metallentfernung:
Schmerzfrei in allen drei Segmenten
Oswestry Disability Index: 6 %

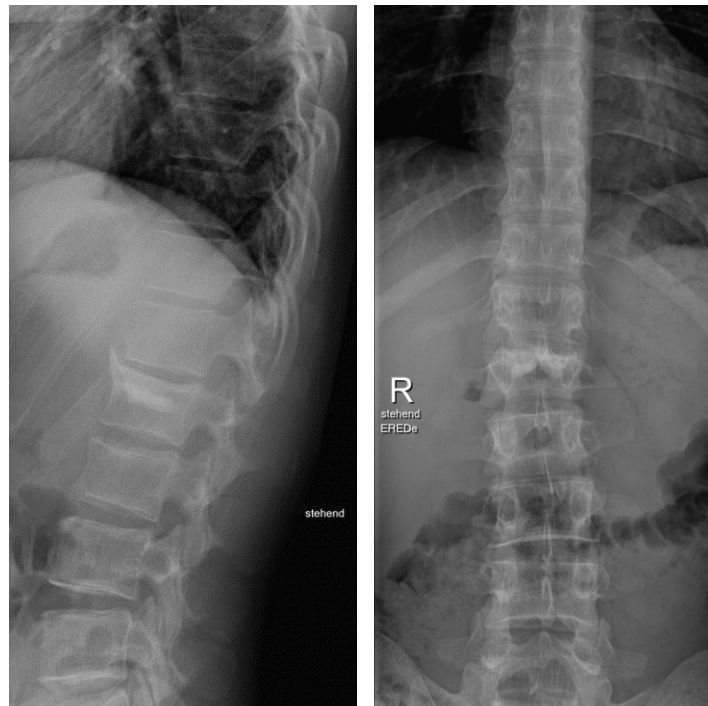


Abbildung 31: Röntgenaufnahmen 3,5 Jahre nach Metallentfernung

Fall 2

- 33 jähriger männlicher Patient
- Unfall mit Paragleiter während der Landephase am 24.09.2013
- Komplette Berstungsfraktur Th12 (A4) ohne neurologischer Ausfallsymptomatik

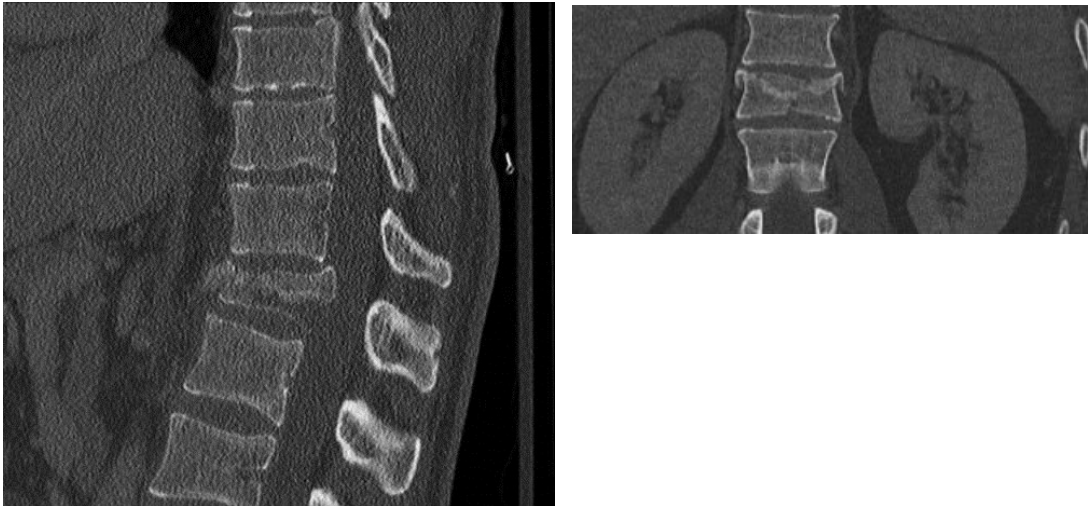


Abbildung 32: präoperative CT-Aufnahmen

- OP am 25.09.2013 mittels Kyphoplastie Th12 und dorsaler Stabilisierung Th11- L1:
Korrektur der Kyphose von 20 Grad auf 6 Grad

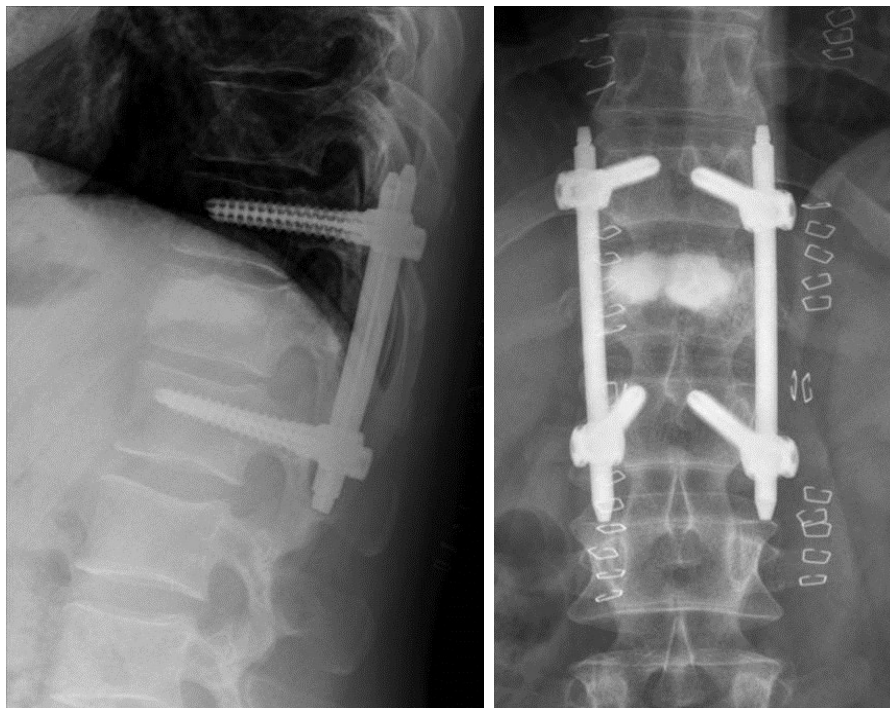


Abbildung 33: postoperative Röntgenaufnahmen

- Kontrolle 10 Monate nach Erstoperation vor geplanter Metallentfernung

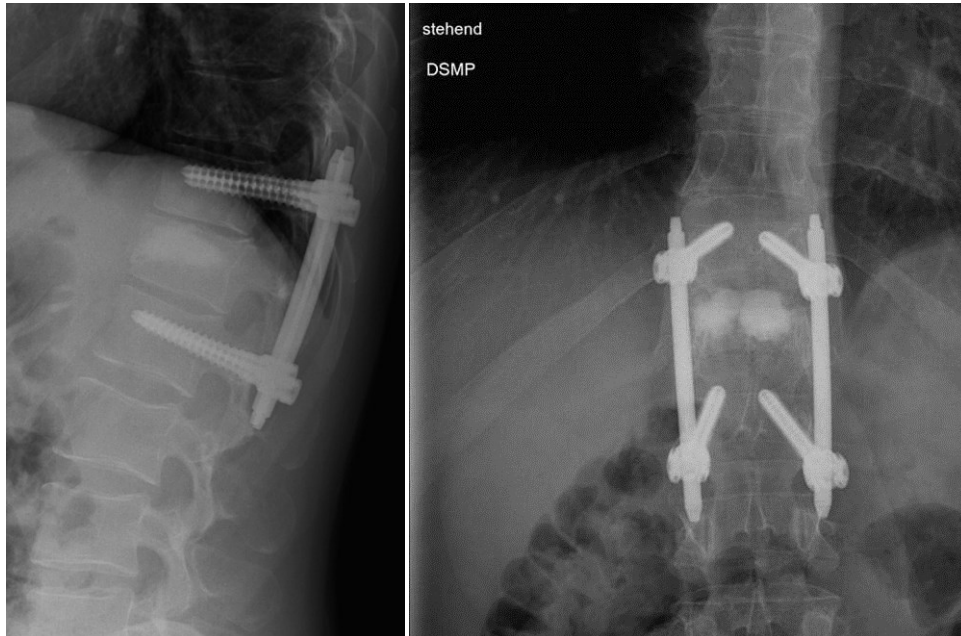


Abbildung 34: Röntgenaufnahmen vor Metallentfernung

- Kontrolle 2,5 Jahre nach Metallentfernung:
Schmerzfrei in allen 3 Segmenten
Oswestry Disability Index: 0%



Abbildung 35: Röntgenaufnahmen 2,5 Jahre nach Metallentfernung

4. Diskussion

Die Behandlung von thorakolumbalen Frakturen ohne neurologischer Symptomatik wird auch heute noch kontrovers diskutiert und kann konservativ oder operativ erfolgen. Jedoch zeigten Studien, dass eine operative Therapie sowohl zu einer schnelleren Schmerzreduktion führt, als auch eine frühere Mobilisation bedingt und damit die Dauer bis zum Wiedereinstieg in den beruflichen Alltag erheblich verkürzt. Als problematisch wurden in der Vergangenheit immer wieder die operativen Möglichkeiten in Verbindung mit der Invasivität und dem funktionellem Outcome angesehen. Auf der einen Seite bedingt die Rekonstruktion der vorderen Säule über den invasiven ventralen Zugang ein hohes Risiko an Komplikationen und postoperativer Morbidität, auf der anderen Seite ermöglicht die dorsale Stabilisierung zwar anfangs eine gute Stabilisierung und Wiederherstellung des Alignments, jedoch kommt es bei alleiniger dorsaler Instrumentierung zu einer höheren Rate an Materialbrüchen mit teils erheblichen Korrekturverlusten, da die mittlere und vordere Säule nicht rekonstruiert wurde. Die Technik der Kyphoplastie ermöglicht nun von dorsal eine gute Rekonstruktion der vorderen Säule, die nicht nur bei osteoporotischen Frakturen sondern auch bei jungen Patienten mit traumatischen Berstungsfrakturen angewendet wird und gute Ergebnisse bezüglich Funktion, Lebensqualität und Schmerzreduktion zeigt [79].

Die Überlegung für die Behandlung solcher Frakturen eine Hybridtechnik zu verwenden war, dass durch das zusätzliche Einbringen eines minimalinvasiven dorsalen Stabilisierungssystems die traumatisch bedingte Kyphose und Wirbelkörperhöhe auch auf lange Sicht hin korrigiert werden kann.

Die mit der Operation erreichte mittlere Anhebung der Wirbelkörperhöhe an der Vorderkante um 25,97 %, im Zentrum um 24,9 % sowie im Bereich der Hinterkante um 7,2 % zeigten gute und statistisch signifikante Ergebnisse. Da diese Operationstechnik noch keine breite Anwendung findet, existierten demnach nur wenige Studien mit einer geringen Anzahl an StudienteilnehmerInnen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Afzal et al., die eine Studie an 16 PatientInnen durchführte, welche mit der gleichen Methode operiert wurden. Auch sie konnten initial bei den PatientInnen die durchschnittliche Wirbelkörperhöhe an

der Vorderkante um 29 % und im Zentrum um 16 % korrigieren [80]. Bironneau et al. konnten in einer prospektiven Kohortenstudie an 24 PatientInnen ebenfalls einen postoperativen Höhengewinn an der Vorderkante von 21,3 % verzeichnen [81].

Obwohl die Wirbelkörper durch die Operation gut aufgerichtet wurden, zeigte sich zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung ein Korrekturverlust von 6,15 % an der Vorderkante, 5,35 % im Zentrum des Wirbelkörpers und 0,77 % an der Hinterkante. Fuentes et al. kamen 2010 zu ähnlichen Ergebnissen, sie ermittelten aber nur die Wirbelkörperhöhe an der Vorderkante und stellten nach 24 Monaten einen durchschnittlichen Korrekturverlust von 3 % bei 18 behandelten PatientInnen fest [82].

In dieser Studie sind wir zur Erkenntnis gekommen, dass der überwiegende Teil der postoperativen Höhenminderung in den ersten Monaten noch vor Entfernung des Fixateurs interne passiert. Bei der abschließenden Untersuchung zeigten sich stabile Verhältnisse mit annähernd gleichbleibender Wirbelkörperhöhe. Der Verlust an der Vorderkante betrug lediglich 0,23 %, im Zentrum 0,2 % und an der Hinterkante konnte sogar eine Zunahme (Messtoleranzen bzw. Aufnahmetechniken?) um 0,29 % beobachtet werden.

Messungen des bisegmentalen kyphotischen Winkel nach Cobb ergaben zwar primär ein gutes Korrekturergebnis, nahmen aber bis zum Zeitpunkt der Metallentfernung deutlich zu und waren nur mehr gering besser als zum Zeitpunkt der Fraktur. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmetechniken (präoperativ im Liegen- postoperativ im Stehen) muss aber von einer doch etwas höheren Korrektur ausgegangen werden. Welchen Einfluss die Aufnahmeposition auf den bisegmentalen Kyphosewinkel hat, ist nicht bekannt. Definitiv vergleichbar sind die Zeitpunkte vor und nach Metallentfernung, da alle Aufnahmen in stehender Position durchgeführt wurden. Messungen ergaben hier eine statistisch nicht signifikante Zunahme der Kyphose von 0,28 Grad. In den Langzeitaufnahmen konnten wir feststellen, dass der Verlust der initialen Korrektur zumeist im kranialen Bandscheibenfach stattfand und einige Patienten bereits ventral Spondylophyten als Zeichen der Instabilität, aber auch des beginnenden Überbaus des Segments im Röntgen zeigten. Sehr oft gab es aber dazu kein klinisches Korrelat in der segmentalen Diagnostik. Dieser Umstand bestätigt unser derzeitiges operatives Vorgehen und die sehr zurückhaltende Anwendung

ventraler Wirbelkörperersatzender Verfahren an unserer Klinik, da ein destruiertes Bandscheibenfach posttraumatisch laut Ergebnissen dieser Studie in nur weniger als der Hälfte aller Fälle (41,4 %) überhaupt mit klinischen Beschwerden einhergeht. Lediglich ein/e Patient/in gab zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung starke Schmerzen im kranialen und kaudalen Segment an. Vergleichende Werte der segmentalen Schmerzdiagnostik konnten in der Literatur nicht gefunden werden, diese Untersuchung scheint im Zuge dieser operativen Technik bisher einzigartig zu sein. Interessant wäre noch eine Langzeitstudie nach 10 oder 15 Jahren, die genau dieses Thema nachuntersucht und sich mit dem Schicksal der destruierten Bandscheibenfächer beschäftigt.

Der Oswestry Disability Index wurde verwendet um das funktionelle Outcome zu analysieren. Dieser war mit einem durchschnittlichen Wert von 19,86 % sehr zufriedenstellend und zeigte, dass die Gesamtheit aller PatientInnen wieder ihre gewohnten Arbeiten und Aktivitäten ausüben können und kaum Einschränkungen im Alltag erleben.

Eine Korrelation zwischen radiologischem Ergebnis und funktionellem Outcome (ODI und segmentale Schmerzdiagnostik) konnte nicht gefunden werden.

Die Ballonkyphoplastie stellt in Verbindung mit der perkutanen dorsalen Stabilisierung ein exzellentes Verfahren zur Versorgung von thorakolumbalen Berstungsfrakturen dar. Es ist eine sichere und aufgrund der minimalen Invasivität eine komplikationsarme Technik, die zu einer schnellen Reduktion des Schmerzes und Rückkehr in Alltag und Beruf führt. Die guten Ergebnisse mit der Möglichkeit der Rekonstruktion aller drei Säulen stellen eine ernstzunehmende Alternative zur offenen Operationsmethode dar, bedürfen aber noch einer weiteren Evaluation mit größeren Patientenpopulationen.

5. Literaturverzeichnis

- [1]Anderhuber F, Pera F, Streicher J. Waldeyer - Anatomie des Menschen. 19. Auflage Berlin: De Gruyter; 2012.
- [2]Platzer W. Taschenatlas Anatomie, Band 1 Bewegungsapparat. 11. Auflage Stuttgart, New York: Thieme; 2013.
- [3]Schünke M, Schulte E, Schuhmacher U. Prometheus - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 4. Auflage Stuttgart; New York: Thieme; 2014.
- [4]Schünke M. Topografie und Funktion des Bewegungssystems: Funktionelle Anatomie. 2. Auflage Stuttgart, New York: Thieme; 2014.
- [5]Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P. Duale Reihe - Orthopädie und Unfallchirurgie. 7. Auflage Stuttgart: Thieme; 2014.
- [6]Bohndorf K, Imhof H, Wörtler K. Radiologische Diagnostik der Knochen und Gelenke. 3. Auflage Stuttgart: Thieme; 2013.
- [7]Mutschler W, Wirbel R. Pathologische Frakturen. Unfallchirurg 1997;100(6):410-429.
- [8]Bühren V. Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule. Unfallchirurg 2003;106(1):55-69.
- [9]Muller CW, Hufner T, Gosling T, Krettek C. Traumatology of the spine. Chirurg 2008 Oct;79(10):918, 920-6.
- [10]Tscherne H, Blauth M. Tscherne Unfallchirurgie - Wirbelsäule. Berlin, Heidelberg: Springer; 1998.
- [11]Magerl F, Aebi M, Gertzbein S, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. European Spine Journal 1994;3(4):184-201.
- [12]Vaccaro AR, Schroeder GD, Kepler CK, Oner FC, Vialle LR, Kandziora F, et al. The surgical algorithm for the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system. European Spine Journal 2016;25(4):1087-1094.
- [13]Kandziora F, Schleicher P, Schnake K, Reinhold M, Aarabi B, Bellabarba C, et al. Die AOSpine-Klassifikation thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen. Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie 2016;154(01):35-42.
- [14]Böhler L. Technik der Knochenbruchbehandlung im Frieden und im Kriege. : Maudrich; 1941.
- [15]Watson-Jones R. The results of postural reduction of fractures of the spine. J Bone Joint Surg Am 1938;20(3):567-586.

- [16] Nicoll EA. Fractures of the dorso-lumbar spine. *J Bone Joint Surg Br* 1949 Aug;31B(3):376-394.
- [17] Holdsworth F. Fractures, dislocations, and fracture-dislocations of the spine. *J Bone Joint Surg Am* 1970 Dec;52(8):1534-1551.
- [18] Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 1983;8(8):817-831.
- [19] Eisoldt S. *Fallbuch Chirurgie: 145 Fälle aktiv bearbeiten.* : Georg Thieme Verlag; 2010.
- [20] Baierlein SA. *Frakturklassifikationen.* : Georg Thieme Verlag; 2010.
- [21] McAfee PC, Yuan HA, Fredrickson BE, Lubicky JP. The value of computed tomography in thoracolumbar fractures. An analysis of one hundred consecutive cases and a new classification. *J Bone Joint Surg Am* 1983 Apr;65(4):461-473.
- [22] Vaccaro AR, Lehman Jr RA, Hurlbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, et al. A new classification of thoracolumbar injuries: the importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine* 2005;30(20):2325-2333.
- [23] Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013 Nov 1;38(23):2028-2037.
- [24] Reid D, Henderson R, Saboe L, Miller J. Etiology and clinical course of missed spine fractures. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery* 1987;27(9):980-986.
- [25] Bühren V, Josten C. *Chirurgie der verletzten Wirbelsäule: Frakturen, Instabilitäten, Deformitäten.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2012.
- [26] Heyde C, Ertel W, Kayser R. Die Versorgung von Wirbelsäulenverletzungen beim Polytrauma. *Der Orthopäde* 2005;34(9):889-905.
- [27] Ketterl R. Vorgehen bei Wirbelsäulenverletzungen des polytraumatisierten Patienten. *Trauma und Berufskrankheit* 2010;12(2):168-175.
- [28] Rajasekaran S, Kanna RM, Shetty AP. Management of thoracolumbar spine trauma: An overview. *Indian J Orthop* 2015 Jan-Feb;49(1):72-82.
- [29] Hsu JM, Joseph T, Ellis AM. Thoracolumbar fracture in blunt trauma patients: guidelines for diagnosis and imaging. *Injury* 2003;34(6):426-433.
- [30] Wood KB, Li W, Lebl DS, Ploumis A. Management of thoracolumbar spine fractures. *The Spine Journal* 2014;14(1):145-164.

- [31]Ballock RT, Mackersie R, Abitbol JJ, Cervilla V, Resnick D, Garfin SR. Can burst fractures be predicted from plain radiographs? *J Bone Joint Surg Br* 1992 Jan;74(1):147-150.
- [32]Henderson RL, Reid DC, Saboe LA. Multiple noncontiguous spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)* 1991 Feb;16(2):128-131.
- [33]Van Goethem JW, Maes M, Özsarlak Ö, van den Hauwe L, Parizel PM. Imaging in spinal trauma. *Eur Radiol* 2005;15(3):582-590.
- [34]Vaccaro AR, Kim DH, Brodke DS, Harris M, Chapman J, Schildhauer T, et al. Diagnosis and management of thoracolumbar spine fractures. *J Bone Joint Surg Am* 2003;85(12):2456-2470.
- [35]Baumert B, Blautzik J, Körner M, Reiser M, Linsenmaier U. Aktuelle bildgebende Diagnostik der Wirbelsäulenerkrankungen. *Der Chirurg* 2008;79(10):906-917.
- [36]Müller ME, Schneider R, Willenegger H. *Manual der Osteosynthese: AO-Technik.* : Springer; 2013.
- [37]Stannard JP, Schmidt AH, Kregor PJ, Wentzensen A, Gebhard F, Grützner PA, et al. *Spezielle Unfallchirurgie.* : Georg Thieme Verlag; 2011.
- [38]Vaccaro A, Kandziora F, Fehlings M. *AO Surgery Reference - Thoracic and lumbar trauma.* 2014; unter: <https://www2.aofoundation.org/wps/portal/surgery?showPage=diagnosis&bone=Spine&segment=TraumaThoracolumbar> [Stand: März 2017].
- [39]Daniaux H, Wagner M, Kathrein A, Lang T. Frakturen des thorakolumbalen Übergangs. *Der Orthopäde* 1999;28(8):682-691.
- [40]Maier B, Ploss C, Marzi I. Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule. *Der Orthopäde* 2010;39(3):247-255.
- [41]Reinhold M, Knop C, Lange U, Bastian L, Blauth M. Nichtoperative Behandlung von Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule. *Unfallchirurg* 2003;106(7):566-576.
- [42]Chow GH, Nelson BJ, Gebhard JS, Brugman JL, Brown CW, Donaldson DH. Functional outcome of thoracolumbar burst fractures managed with hyperextension casting or bracing and early mobilization. *Spine* 1996;21(18):2170-2175.
- [43]Rajasekaran S. Thoracolumbar burst fractures without neurological deficit: the role for conservative treatment. *European Spine Journal* 2010;19(1):40-47.
- [44]McLain RF, Burkus JK, Benson DR. Segmental instrumentation for thoracic and thoracolumbar fractures: prospective analysis of construct survival and five-year follow-up. *The Spine Journal* 2001;1(5):310-323.

- [45]McLain RF, Sparling E, Benson DR. Early failure of short-segment pedicle instrumentation for thoracolumbar fractures. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Am* 1993 Feb;75(2):162-167.
- [46]Speth MJ, Oner FC, Kadic MA, de Klerk LW, Verbout AJ. Recurrent kyphosis after posterior stabilization of thoracolumbar fractures: 24 cases treated with a Dick internal fixator followed for 1.5-4 years. *Acta Orthop Scand* 1995;66(5):406-410.
- [47]Been H, Bouma G. Comparison of two types of surgery for thoraco-lumbar burst fractures: combined anterior and posterior stabilisation vs. posterior instrumentation only. *Acta Neurochir* 1999;141(4):349-357.
- [48]Daniaux H. Transpedikuläre Reposition und Spongiosaplastik bei Wirbelkörperbrüchen der unteren Brust-und Lendenwirbelsäule. *Unfallchirurg* 1986;89(5):197-213.
- [49]Weckbach A, Vogel S. Einfluß der transpedikularen intercorporellen Spongiosaplastik auf den Korrekturverlust nach alleiniger dorsaler Instrumentierung thoracolumbalen Wirbelsäulenverletzungen. *Hefte zu der Unfallchirurg* 1997;268:205-207.
- [50]Knop C, Fabian HF, Bastian L, Blauth M. Late results of thoracolumbar fractures after posterior instrumentation and transpedicular bone grafting. *Spine* 2001;26(1):88-99.
- [51]Alanay A, Acaroglu E, Yazici M, Oznur A, Surat A. Short-segment pedicle instrumentation of thoracolumbar burst fractures: does transpedicular intracorporeal grafting prevent early failure? *Spine* 2001;26(2):213-217.
- [52]Toyone T, Ozawa T, Wada Y, Kamikawa K, Watanabe A, Yamashita T, et al. Transpedicular hydroxyapatite grafting with indirect reduction for thoracolumbar burst fractures with neurological deficit: A prospective study. *Indian J Orthop* 2007 Oct;41(4):368-373.
- [53]Prokop A, Koukal C, Dolezych R, Chmielnicki M. Minimalinvasive Versorgung von thorakolumbalen Wirbelfrakturen. *Trauma und Berufskrankheit* 2012;14(3):335-343.
- [54]Galibert P, Deramond H, Rosat P, Le Gars D. Preliminary note on the treatment of vertebral angioma by percutaneous acrylic vertebroplasty. *Neurochirurgie* 1987;33(2):166-168.
- [55]Jensen ME, Evans AJ, Mathis JM, Kallmes DF, Cloft HJ, Dion JE. Percutaneous polymethylmethacrylate vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral body compression fractures: technical aspects. *AJNR Am J Neuroradiol* 1997 Nov-Dec;18(10):1897-1904.
- [56]Hulme PA, Krebs J, Ferguson SJ, Berlemann U. Vertebroplasty and kyphoplasty: a systematic review of 69 clinical studies. *Spine (Phila Pa 1976)* 2006 Aug 1;31(17):1983-2001.

- [57]Mathis JM, Ortiz AO, Zoarski GH. Vertebroplasty versus kyphoplasty: a comparison and contrast. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004 May;25(5):840-845.
- [58]Weiß T, Hauck S, Bühren V, Gonschorek O. Repositionsmöglichkeiten mittels perkutaner dorsaler Instrumentierung. *Unfallchirurg* 2014;117(5):428-436.
- [59]Pishnamaz M, Lichte P, Sellei R, Pape H, Kobbe P. Perkutane dorsale Stabilisierung der Brust-und Lendenwirbelsäule mit aktiver intraoperativer Repositionsmöglichkeit. *Operative Orthopädie und Traumatologie* 2015;27(5):439-447.
- [60]Palaskali N. Ergebnisse nach dorsaler minimalinvasiver Spondylodese und Kyphoplastie. 2015.
- [61]Da Fonseca K, Baier M, Grafe I, Libicher M, Noeldge G, Kasperk C, et al. OP-Technik der Ballon-Kyphoplastie. *Unfallchirurg* 2006;109(5):401-405.
- [62]Schmidt-Rohlfing B, Reilmann H, Pfeifer R, Kobbe P, Pape HC. Kyphoplasty and vertebroplasty. Indications, techniques, complications and results. *Unfallchirurg* 2011 May;114(5):431-40; quiz 41-2.
- [63]Lendemans S, Hussmann B, Kauther MD, Nast-Kolb D, Taeger G. Minimally invasive dorsal stabilization of the thoracolumbar spine. *Unfallchirurg* 2011 Feb;114(2):149-59; quiz 160.
- [64]Spivak JM, Johnson MG. Percutaneous treatment of vertebral body pathology. *J Am Acad Orthop Surg* 2005;13(1):6-17.
- [65]DaFonseca K, Baier M, Grafe I, Libicher M, Noeldge G, Kasperk C, et al. Ballonkyphoplastie in der Therapie von Wirbelkörperfrakturen. *Unfallchirurg* 2006;109(5):391-400.
- [66]Verlaan JJ, van de Kraats EB, Oner FC, van Walsum T, Niessen WJ, Dhert WJ. The reduction of endplate fractures during balloon vertebroplasty: a detailed radiological analysis of the treatment of burst fractures using pedicle screws, balloon vertebroplasty, and calcium phosphate cement. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005 Aug 15;30(16):1840-1845.
- [67]Uppin AA, Hirsch JA, Centenera LV, Pfeifer BA, Pazianos AG, Choi IS. Occurrence of New Vertebral Body Fracture after Percutaneous Vertebroplasty in Patients with Osteoporosis 1. *Radiology* 2003;226(1):119-124.
- [68]Moon ES, Kim HS, Park JO, Moon SH, Lee HM, Shin DE, et al. The incidence of new vertebral compression fractures in women after kyphoplasty and factors involved. *Yonsei Med J* 2007 Aug 31;48(4):645-652.
- [69]Große-Leege H, Winker KH. Operative Behandlung von Wirbelfrakturen-dorsale Instrumentierung. *OP-JOURNAL* 2001;17(02):156-160.

- [70]Schieker M, Heiss C, Mutschler W. Knochenersatzmaterialien. Unfallchirurg 2008;111(8):613-620.
- [71]Garcia P, Franz D, Raschke M. Knochenersatzmaterialien–Grundlagen und klinischer Nutzen. Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie 2014;152(02):152-160.
- [72]Arabmotlagh M, Rauschmann M. Füllmaterialien zur Augmentation von osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen. Der Orthopäde 2010;39(7):687-692.
- [73]Breusch S, Kühn K. Knochenzemente auf Basis von Polymethylmethacrylat. Der Orthopäde 2003;32(1):41-50.
- [74]Claes L, Hoellen I, Ignatius A. Resorbierbare Knochenzemente. Orthopäde 1997;26(5):459-462.
- [75]Ambard AJ, Mueninghoff L. Calcium phosphate cement: review of mechanical and biological properties. Journal of Prosthodontics 2006;15(5):321-328.
- [76]Fairbank JC, Couper J, Davies JB, O'Brien JP. The Oswestry low back pain disability questionnaire. Physiotherapy 1980 Aug;66(8):271-273.
- [77]Fairbank JC, Pynsent PB. The Oswestry disability index. Spine 2000;25(22):2940-2953.
- [78]Hochschild J. Strukturen und Funktionen begreifen, Funktionelle Anatomie: Band 1: Wirbelsäule und obere Extremität. : Georg Thieme Verlag; 2014.
- [79]Hartmann F, Gercek E, Leiner L, Rommens PM. Kyphoplasty as an alternative treatment of traumatic thoracolumbar burst fractures Magerl type A3. Injury 2012;43(4):409-415.
- [80]Afzal S, Akbar S, Dhar SA. Short segment pedicle screw instrumentation and augmentation vertebroplasty in lumbar burst fractures: an experience. European Spine Journal 2008;17(3):336-341.
- [81]Bironneau A, Bouquet C, Millet-Barbe B, Leclercq N, Pries P, Gayet L. Percutaneous internal fixation combined with kyphoplasty for neurologically intact thoracolumbar fractures: a prospective cohort study of 24 patients with one year of follow-up. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 2011;97(4):389-395.
- [82]Fuentes S, Blondel B, Metellus P, Gaudart J, Adetchessi T, Dufour H. Percutaneous kyphoplasty and pedicle screw fixation for the management of thoraco-lumbar burst fractures. European Spine Journal 2010;19(8):1281-1287.
- [83]wei Tian J, Wang L, Xia T, yi Liu C, hua Zhao Q, hai Dong S. Posterior short-segmental fixation combined with intermediate screws vs conventional intersegmental fixation for monosegmental thoracolumbar fractures. Orthopedics 2011;34(8):e389-e396.

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Knöchernen Wirbelsäule in der Ansicht von ventral, dorsal und lateral	4
Abbildung 2: Ansicht des 6. Brustwirbel von kranial, lateral und ventral.....	7
Abbildung 3: Ansicht des 2. Lendenwirbels von kranial, lateral und frontal	8
Abbildung 4: 3-Säulen-Modell nach Denis	19
Abbildung 5: Subtyp A0	23
Abbildung 6: Subtyp A1	23
Abbildung 7: Subtyp A2	24
Abbildung 8: Subtyp A3	24
Abbildung 9: Subtyp A4	24
Abbildung 10: ASIA - Klassifikation	28
Abbildung 11: Operative Lagerung	39
Abbildung 12: Extrapedikulärer Zugang	39
Abbildung 13: Transpedikulärer Zugang	40
Abbildung 14: Geschlechterverteilung der PatientInnen	54
Abbildung 15: Altersverteilung der PatientInnen	54
Abbildung 16: Messung der Wirbelkörperhöhe	58
Abbildung 17: Messung des bisegmentalen Kyphosewinkels nach Cobb [83]	59
Abbildung 18: Verteilung der Frakturen nach Art des Unfallmechanismus	60
Abbildung 19: Verteilung der betroffenen Wirbelkörper	61
Abbildung 20: Verteilung der PatientInnen nach Wahl des Zements	62
Abbildung 21: Ergebnisse des Oswestry Disability Index	63
Abbildung 22: Ergebnisse der segmentalen Schmerzdiagnostik	64
Abbildung 23: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe an der Vorderkante	66
Abbildung 24: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe im Zentrum	67
Abbildung 25: Entwicklung der Wirbelkörperhöhe an der Hinterkante	68
Abbildung 26: Höhenentwicklung des Wirbelkörpers an der Vorderkante, Hinterkante und im Zentrum	69
Abbildung 27: Entwicklung des bisegmentalen Kyphosewinkels	71
Abbildung 28: präoperative CT-Aufnahmen	72
Abbildung 29: postoperative Röntgenaufnahmen	72
Abbildung 30: Röntgenaufnahmen vor Metallentfernung	73
Abbildung 31: Röntgenaufnahmen 3,5 Jahre nach Metallentfernung	73

Abbildung 32: präoperative CT-Aufnahmen	74
Abbildung 33: postoperative Röntgenaufnahmen.....	74
Abbildung 34: Röntgenaufnahmen vor Metallentfernung	75
Abbildung 35: Röntgenaufnahmen 2,5 Jahre nach Metallentfernung.....	75

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Frakturklassifikation nach Denis	19
Tabelle 2: Gruppeneinteilung des Oswestry Disability Index	56
Tabelle 3: Statistische Ergebnisse an der Vorderkante des Wirbelkörpers	65
Tabelle 4: Statistische Ergebnisse im Zentrum des Wirbelkörpers	66
Tabelle 5: Statistische Ergebnisse an der Hinterkante des Wirbelkörpers.....	67
Tabelle 6: Statistische Ergebnisse des bisegmentalen Kyphosewinkels	70

Anhang Studienprotokoll

Prüfprotokoll

„Repositionsergebnisse und Korrekturverluste nach perkutaner minimalinvasiver Versorgung der vorderen und hinteren Säule bei A3 und A4 Frakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule“

Protokoll-ID: _____
Untersuchungsdatum: ___ / ___ / _____
Untersucher: _____

Patienteninitialen: ____ . ____
Geburtsdatum: ___ / ___ / _____

Frakturtyp: [] A3 [] A4
Frakturlevel: _____
OP-Datum: ___ / ___ / _____

Versorgungsart:

Zement: [] PMMA [] CaPh
Schrauben: [] monoaxial [] polyaxial
Komplikationen: [] keine [] _____

Radiologische Auswertung:

	post-traumatisch	post-operativ	vor Metallentfernung	6 Monate nach Metallentfernung
Bisegmentaler Kypohsewinkel (°)				
Wirbelkörperhöhenverlust (%)				

Segmentale Schmerzdiagnostik:

	kein Schmerz	geringe Schmerzen	starke Schmerzen
betroffenes Segment			
kraniales Segment			
kaudales Segment			

Oswestry Disability Index:

Erreichte Punktezahl: ____ von ____
Grad der Behinderung: ____%

- [] minimale Behinderung (0-20%)
- [] mäßige Behinderung (21-40%)
- [] starke Behinderung (41-60%)
- [] invalidisierend (61-80%)
- [] bettlägerig (81-100%)

Anhang Fragebogen: Oswestry Disability Index

Protokoll-ID: _____

1. Schmerzintensität

Ich habe momentan keine Schmerzen	0
Die Schmerzen sind momentan sehr schwach	1
Die Schmerzen sind momentan mäßig	2
Die Schmerzen sind momentan ziemlich stark	3
Die Schmerzen sind momentan sehr stark	4
Die Schmerzen sind momentan unvorstellbar stark	5

2. Körperpflege

Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, ohne dass die Schmerzen dadurch stärker werden	0
Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft	1
Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft	2
Ich kann meine Körperpflege normal durchführen, aber es ist schmerzhaft	3
Ich brauche täglich Hilfe bei den meisten Aspekten der Körperpflege	4
Ich kann mich nicht selbst anziehen, wasche mich mit Mühe und bleibe im Bett	5

3. Heben

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

4. Gehen

Schmerzen hindern mich nicht daran, so weit zu gehen, wie ich möchte	0
Schmerzen hindern mich daran, mehr als 1–2 km zu gehen	1
Schmerzen hindern mich daran, mehr als 0.5 km zu gehen	2
Schmerzen hindern mich daran, mehr als 100 m zu gehen	3
Ich kann nur mit einem Stock oder Krücken gehen	4
Ich bin die meiste Zeit im Bett und muss mich zur Toilette schleppen	5

5. Sitzen

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

6. Stehen

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

7. Schlafen

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

8. Sexualleben (falls zutreffend)

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

9. Sozialleben

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

10. Reisen

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